

Fig. 1: Die Aachquelle von Silden gesehen (Foto: A. SCHREINER, 1968).

Kombinierte Karstwasseruntersuchungen im Gebiet der Donauversickerung (Baden-Württemberg) in den Jahren 1967—1969

Von H. BATSCHÉ, F. BAUER, H. BEHRENS, K. BUCHTELA, H. J. DOMBROWSKI,
R. GEISLER, M. A. GEYH, H. HÖTZL, F. HRIBAR, W. KÄSS, J. MAIRHOFER,
V. MAURIN, H. MOSER, F. NEUMAIER, J. SCHMITZ, W. A. SCHNITZER,
A. SCHREINER, H. VOGG & J. ZÖTL
(Mit 72 Textfiguren und 5 Tafeln im Anhang)

Inhalt

Vorwort

Einleitung

1. Das Untersuchungsgebiet

1. 1. Zur Geologie des Donau-Aach-Gebietes (A. SCHREINER)

1. 1. 1. Schichtaufbau und hydrologische Eigenschaften der Gesteine

1. 1. 2. Lagerungsverhältnisse und Schichtstörungen

1. 1. 3. Verkarstung

1. 1. 4. Morphogenetischer Überblick

1. 2. Zur Hydrologie des Donau-Aach-Gebietes (H. HÖTZL)

1. 2. 1. Hydrographische Übersicht

1. 2. 2. Die hydrogeologischen Verhältnisse

1. 2. 3. Der Chemismus der Quellwässer

2. Der natürliche Carbon-14- und Tritiumgehalt der Wässer (M. A. GEYH & J. MAIRHOFER)

3. Der kombinierte Markierungsversuch 1969

3. 1. Eingabestellen und Markierungsmittel

3. 2. Die Beobachtungsstellen und deren Kontrolle

3. 3. Durchführung und Ergebnisse der Markierungsversuche

3. 3. 1. Die Ergebnisse mit Kalidüngesalz (Eingabestelle A)

3. 3. 2. Die Ergebnisse mit dem Duftstoff Dipenten (Eingabestelle A)

- 3. 3. 3. Die Ergebnisse mit Sulforhodamin G extra (Eingabestelle B)
 - 3. 3. 4. Die Ergebnisse mit Brom (Eingabestelle C)
 - 3. 3. 5. Die Ergebnisse mit Chrom-51 (Eingabestelle D)
 - 3. 3. 6. Die Ergebnisse mit Lanthan (Eingabestelle D)
 - 3. 3. 7. Die Ergebnisse mit Detergentien (Eingabestelle E)
 - 3. 3. 7. 1. Die Bestimmung der Detergentien mittels Kolorimetrie
 - 3. 3. 7. 2. Die Bestimmung der Detergentien mittels der Schaumhöhenmethode
 - 3. 3. 8. Die Ergebnisse mit dem Duftstoff Isobornylazetat (Eingabestelle E)
 - 3. 3. 9. Die Ergebnisse mit Uranin (Eingabestelle F)
 - 3. 3. 9. 1. Die Direktbestimmung von Uranin
 - 3. 3. 9. 2. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Uraninanreicherung mit Aktivkohle
 - 3. 3. 9. 3. Die Untersuchung auf Uranin mittels Aktivkohlefiltration
 - 3. 3. 10. Die Ergebnisse mit *Serratia marcescens* (Eingabestelle G)
 - 3. 3. 11. Die Ergebnisse mit braunefärbten *Lycopodium*sporen (Eingabestelle G)
 - 3. 3. 12. Die Ergebnisse mit Steinsalz (Eingabestelle H)
 - 3. 3. 13. Die Ergebnisse mit grüngefärbten *Lycopodium*sporen (Eingabestelle I)
3. 4. Zusammenfassung der Ergebnisse des kombinierten Markierungsversuches 1969

Literatur

Summary

Vorwort

Als ich auf der Frühjahrstagung 1964 der Deutschen Geologischen Gesellschaft V. MAURIN kennenlernte, ist erstmals der Gedanke aufgetaucht, die Fachleute für Grund- und Karstwassermarkierungen zu einer Fachtagung zusammenzurufen. Wie in keinem anderen Fachgebiet waren bis dahin die Veröffentlichungen in den verschiedensten, z. T. abseitigsten Publikationsorganen verstreut. Oft arbeiteten mehrere Kollegen an ein und demselben Problem, und oft war die Anwendung des einen oder anderen Markierungsmittels nur deshalb verbaut, weil man die diesbezügliche Technik wohl aus dem Schrifttum, nicht aber von der Anschauung her kannte.

Aus der Anregung 1964 wurde die Fachtagung vom 28. März bis 1. April 1966 in Graz Wirklichkeit. Die damalige Tagung verband erstmals die Fachleute zu einer gemeinsamen Vortragsveranstaltung. Rückblickend erscheint mir heute, daß der persönliche Kontakt und die Vorführung der Untersuchungstechnik für verschiedene Markierungsmittel noch nachhaltiger wirkten als die Vorträge selbst. Damals wurden gleichzeitig mit der Tagung Versuche in zwei Versuchsgebieten durchgeführt, was für die Veranstalter zweifellos eine starke Belastung bedeutete. Um sich ganz der Sache widmen zu können, wurde für die 2. Fachtagung so verfahren, daß zunächst im Jahr 1969 die Versuche erfolgten und erst ein Jahr später, nach Vorliegen der Versuchsergebnisse, die Tagung durchgeführt wird. Der größte Teil dieses Bandes der Steirischen Beiträge zur Hydrogeologie ist der Beschreibung dieser Versuchsergebnisse gewidmet und soll gleichzeitig als Tagungsunterlagen dienen.

Die Vorbereitungen zu den Versuchen gehen bis 1967 zurück. Damals lud ich im Frühjahr die meisten der Mitarbeiter der Versuche von Graz zu einer Rundfahrt durch das Versickerungsgebiet der Donau und zur Aachquelle ein. Man war sich schon damals klar darüber, daß mit der Markierung allein die Möglichkeiten zur Untersuchung des Versickerungsgebietes an der oberen Donau nicht ausgeschöpft waren. Daher wurde das Programm so weitgreifend wie möglich gestaltet. Noch im Jahr 1967 liefen die ergänzenden chemischen und radiologischen Untersuchungen an. Auf einer Sitzung im Frühjahr 1968 in Wien wurde eine Zwischenbilanz gezogen. In einer letzten Vorbesprechung am 6. und 7. Juni 1969 wurden die Einzelheiten der Versuchsdurchführung und der Einspeisetag auf Dienstag, 26. August, vormittag, festgelegt.

Teilweise schienen unüberwindliche Schwierigkeiten aufzutauchen. Hier darf ich die freundschaftliche Mitarbeit meines Kollegen R. GEISLER hervorheben, ohne dessen selbstlosen Einsatz manche der unverhofft auftretenden Schwierigkeiten nicht so ohne weiteres ausgeräumt hätten werden können. So war es beispielsweise notwendig, wenige Wochen

vor dem Versuchstag, das festgefahrene Genehmigungsverfahren durch eine persönliche Vorsprache und mit einem Empfehlungsschreiben des Leiters des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Herrn Präsidenten Prof. Dr. F. KIRCHHEIMER, versehen, beim Oberbürgermeister der Stadt Singen als größtem Aachanlieger wieder in Gang zu bringen. Es waren dazu noch weitere Vorsprachen bei den Maggi-Werken und beim Landrat in Konstanz notwendig.

Andere Schwierigkeiten tauchten auf, als z. B. während der Sommermonate die Erzeugung von Streusalz eingestellt war oder als am Tag vor der Eingabe plötzlich das für den Transport von Markierungsmitteln vorgesehene Fahrzeug ausfiel. Alle Schwierigkeiten wurden schließlich in kameradschaftlicher Zusammenarbeit gemeistert und aus dem Wege geräumt. Die Durchführung der Versuche wäre nicht denkbar gewesen ohne die finanzielle Unterstützung, die das Vorhaben durch die Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung in Karlsruhe gefunden hat. Alle Kosten, die durch besonders aufwendige Markierungsmittel, besonders schwierige Untersuchungen und durch das große Beobachtungsnetz entstanden, wurden von dieser Behörde getragen.

Herr H. HÖTZL befaßte sich eingehend mit dem Versuchsgebiet. Er sammelte unermüdlich Wasserproben, machte Quellmessungen und stellte sich auch insbesondere beim Markierungsversuch für die Eingabe und Entnahmen zur Verfügung. Auch nach dem eigentlichen Versuch wurden von ihm monatliche Stichproben eingeholt. Für seinen unermüdlichen Einsatz sage ich ihm meinen herzlichen Dank. Ferner möchte ich allen übrigen Mitarbeitern bei diesem Großversuch danken, die fast ausschließlich die Kosten für ihre Markierungsmittel, Untersuchungen und Reisekosten aus ihren chronisch bescheidenen Institutsmitteln trugen. Nicht unerwähnt lassen möchte ich die zahlreichen ungenannten Helfer, die bei Tag und Nacht Wasserproben entnahmen, bei Wind und Wetter die Proben beschafften oder nicht endenwollende Versuchsserien untersuchten. Sie opferten ihre Freizeit und verzichteten auf manche Stunde Schlaf. Auch ihnen sei an dieser Stelle gedankt.

Zur Ergänzung der Markierungsversuche im Karstgebiet an der oberen Donau sind weitere Untersuchungen im Pleistozän der nördlichen Breisgauer Bucht bei der Riegeler Enge vorgesehen. Bereits im Juni 1969 wurde mit der Einrichtung des Versuchsfeldes auf der Gemarkung Bahlingen begonnen. Die dortigen Untersuchungen betreffen nicht nur Markierungsversuche im Grundwasserkörper, sondern auch die dazugehörigen radiohydrometrischen Messungen, Pumpversuche und chemischen Untersuchungen sowie die Untersuchungen zur Datierung der Wässer. Der Unterzeichnende wäre überfordert gewesen, wenn beide Vorhaben an der Donau und in der Breisgauer Bucht zugleich durchgeführt worden wären. Da im Winterhalbjahr die schwierigen Arbeiten im Versuchsfeld in der Riegeler Enge ohnehin nicht durch-

geführt werden konnten, wurde mit ihnen im Frühjahr 1970 begonnen. Die Versuchsergebnisse werden auf jeden Fall zur Tagung im Herbst 1970 vorliegen. Auch diese Arbeiten werden erst durch die finanzielle Unterstützung seitens der Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung ermöglicht.

Das Institut für Radiohydrometrie in München (Leitung: Professor Dr. F. NEUMAIER und Prof. Dr. H. MOSER) hat sich sowohl bei den Vorbereitungen als auch bei der Durchführung der Untersuchungen in beiden Versuchsgebieten mit beträchtlichem Personal- und Materialaufwand beteiligt, wofür ebenfalls auch an dieser Stelle gedankt sei.

Herrn Präsident Prof. Dr. F. KIRCHHEIMER, Leiter des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, gebührt besonderer Dank für die wohlwollende Unterstützung, die er beiden Versuchsvorhaben und der Fachtagung erwies. Er hat mehr als einmal Schwierigkeiten beseitigt, die unter Umständen das ganze Unternehmen in Frage gestellt hätten.

Zuletzt, aber durchaus nicht letztlich, möchte ich Herrn Kollegen J. ZÖRL und mit ihm der Vereinigung für hydrogeologische Forschungen in Graz meinen allerherzlichsten Dank aussprechen. Die Vereinigung übernahm neben der Mitwirkung an den Versuchen im Band 21/1969 der Steirischen Beiträge zur Hydrogeologie die Drucklegung des von mir gesammelten Schrifttums über die Donauversickerung zwischen Immendingen und Fridingen und in diesem Band die Publikation der dort in den Jahren 1967 bis 1970 abgelaufenen kombinierten Karstwasseruntersuchungen. Die Schriftleitung lag in den Händen von Herrn ZÖRL, der nicht nur bei der Redaktion, sondern auch bei Besprechungen stets dafür sorgte, daß die Versuche und die Fachtagung ihren richtigen Rahmen erhielten.

WERNER KÄSS

Einleitung

Die junge Donau durchbricht kaum 20 km nach ihrem Ursprung aus dem Zusammenfluß von Brigach und Breg die Albtafel (Tafel I). In den kalkigen Ablagerungen des Oberen Jura erleidet sie Wasserverluste, die bei geringer Wasserführung zur Trockenlegung des Flußbettes führen.

Die Wasserverluste der Donau unterhalb Immendingen erregten schon zu Beginn des 18. Jahrhunderts bei den Einwohnern der württembergischen Stadt Tuttlingen Besorgnis. Zwar trat damals noch keine Vollversickerung ein, doch der empfindliche Wassermangel im Vorfluter Donau schuf bei den fehlenden hygienischen Einrichtungen früherer Jahrhunderte wenig erquickliche Verhältnisse. In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts, gerade zu der Zeit, als allorten kleine und kleinste Wasserkräfte in Nutzung genommen wurden, trat 1874 erstmals eine Vollversickerung der Donau beim Brühl zwischen

Immendingen und Möhringen ein. Kurz unterhalb der Vollversickerungsstelle tritt der Donaulauf von badischem auf württembergisches Gebiet über. Die Geschädigten waren also in der Hauptsache Württemberger, während die Nutznießer des versickernden Donauwassers im badischen Hegau an der Aach zu suchen waren. Baden war also insofern im Vorteil, als sowohl die Hauptversickerungsstelle als auch der Wiederaustritt des Wassers auf seinem Gebiet lag.

Zunächst war der Zusammenhang zwischen den Versickerungsstellen und der Aachquelle nur zu vermuten. Erst als die Interessengegensätze sich zuspitzten, suchte man auch Beweise. Es war der Karlsruher Geognost A. KNOP, der die wissenschaftlichen Untersuchungen vorantrieb. Ein erster Versuch im Jahre 1869, die Donau mit dem Farbstoff Anilinrot zu färben, mißlang. Im Spätsommer 1877 versuchte er es gleich mit drei Mitteln: Schieferöl, Salz und Fluoreszein. Alle drei Markierungsmittel sind nach 2½ Tagen in der Aachquelle wieder aufgetreten. Unseres Wissens war dies die erste erfolgreiche Markierung unterirdischer Gewässer, die wissenschaftlich bearbeitet wurde. Der Salzungsversuch wurde von A. KNOP gravimetrisch-quantitativ erfaßt. Für die Farbtintensitäten des Fluoreszeins in der Aachquelle werden von ihm nur relative Werte angegeben.

Gegen Ende der neunziger Jahre wurden von Baurat M. GUGENHAN die kleineren Versickerungsstellen unterhalb Fridingen entdeckt. Einige Jahre danach ist auch von dort der hydrologische Zusammenhang mit der Aachquelle nachgewiesen worden. Da diese Versickerungsstellen auf württembergischem Gebiet liegen, sah darin die Stuttgarter Regierung eine Stärkung ihrer Position im Streit um das Donauwasser mit Baden. Die Folge waren langwierige Auseinandersetzungen zwischen Baden und Württemberg. Eine Einigung scheiterte wiederholt an geringfügigen Meinungsverschiedenheiten.

Der durch den 1. Weltkrieg unterbrochene Streit entbrannte in den zwanziger Jahren erneut. Nachdem auf württembergischer Seite das Kraftwerk Fridingen in Betrieb genommen worden war, wo ein Stollen die Donauschleife abschneidet, war die Einigungsmöglichkeit mit Baden vollends blockiert. Ein umfangreiches Schrifttum zeugt davon, wie viele Wasserwirtschaftler, Geologen, Ingenieure und schließlich auch Rechtswissenschaftler sich um eine Lösung der Donauversickerungsfrage bemühten (W. KÄSS, 1969). Auch in den Jahren, als das Reich allein die Wasserhoheit innehatte, wurde keine Lösung erzielt. Diesmal unterbrach der 2. Weltkrieg die Bemühungen um die Zufriedenstellung beider Länder. Nach dem 2. Weltkrieg hatte einerseits die Wasserkraft nicht mehr die Bedeutung wie ehemals, andererseits war mit der Zusammenlegung der Länder Baden und Württemberg im Jahre 1952 die Donauversickerung plötzlich kein Politikum mehr, sondern nur noch eine rein „wasserwirtschaftliche Aufgabe“ (K. SCHMIDT, 1961).

Man hat inzwischen erkannt, daß das Phänomen „Donauversickerung“ so komplex ist, daß für jeden Lösungsversuch Gegenargumente beigebracht werden können. Zu viele Fragen sind noch offen, und zu viele Erscheinungen können nicht einfach formelmäßig erfaßt werden. Die in diesem Jahr anlaufende Umleitung durch den Immendinger-Möhringer Stollen ist lediglich als Versuch anzusehen, die Auswirkungen einer kleinen umgeleiteten Menge zu erfassen. Damit hat das Donauversickerungs-Problem einen vorläufigen Abschluß erfahren.

Eine gewisse Kenntnis über die Abflußverhältnisse bei den Versickerungsstellen, die Vielfalt der unterirdischen Wege zur Aachquelle sowie eine Reihe von offenen Fragen waren der ideale Nährboden, hier die im folgenden beschriebenen umfangreichen vergleichenden Markierungsversuche durchzuführen. Es war zunächst zu entscheiden, ob alle verfügbaren Markierungsmittel an einer einzigen Stelle eingespeist werden sollten, oder ob verschiedene Stellen zugleich geimpft werden sollten. Im ersteren Falle wären zweifellos bessere Vergleiche der Markierungsmittel untereinander zu erzielen gewesen. Man entschied sich schließlich, die Markierungsmittel an verschiedenen Stellen so einzusetzen, daß möglichst viele karsthydrologische Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Dies bedingte jedoch einen erheblichen Aufwand sowohl bei den Einspeisungen als auch für die Beobachtung. Die erzielten Ergebnisse gaben der Wahl der zweiten Versuchsdurchführung recht.

Ein so umfassender Markierungsversuch wäre jedoch unvollkommen, wenn nicht gleichzeitig ergänzende Untersuchungen über das Grund- und Karstwasser durchgeführt worden wären. Diese betrafen nicht nur die chemische, sondern auch die radiologische Untersuchung der Wässer. Es erscheint zweckmäßig, der Beschreibung des Versuches und seiner Ergebnisse zuerst eine geologisch-tektonische sowie eine hydrologische Beschreibung des Versuchsgebietes voranzustellen. In den hydrologischen, hydrochemischen und radiohydrometrischen Abschnitten werden die Ergebnisse der länger laufenden Wasserbeobachtungen mitgeteilt. Wie wichtig beispielsweise radiologische Messungen an Wässern sind, geht daraus hervor, daß im Versuchsgebiet benachbarte Wasseraustritte gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen, jedoch verschieden alt sind. Wenn auch das Milieu des Untergrundes dem Chemismus eines Wassers seinen Stempel aufdrückt, so wird jedoch der Tritium- oder Radiokohlenstoffgehalt dadurch nicht verändert. Die Beobachtung des Versuchsgebietes und die Durchführung und Publikation des Versuches mit seinen Ergebnissen ist eine Gemeinschaftsarbeit, an der folgende Institutionen beteiligt waren:

Atominstitut der Österreichischen Hochschulen, Wien; Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Wien; Geologisches Institut der Universität Erlangen; Geologisches Landesamt Baden-Württemberg in Freiburg i. Br.; Hidrometeoroloski Zavod SRS, Ljubljana; Institut für

Balneologie und Klimaphysiologie an der Universität Freiburg; Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, München; Laboratorium für Isotopentechnik, Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., Karlsruhe; Landesstelle für Gewässerkunde, Außenstelle, Freiburg i. Br.; Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung in Hannover; Speläologisches Institut beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien; Vereinigung für hydrogeologische Forschungen in Graz; Zweiter Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe.

1. Das Untersuchungsgebiet

1. 1. Zur Geologie des Donau-Aach-Gebietes (A. SCHREINER)

1. 1. 1. Schichtaufbau und hydrologische Eigenschaften der Gesteine

Der Untergrund des Donau-Aach-Gebietes wird vorwiegend aus kalkigen und mergeligen Gesteinen des Oberen Juras aufgebaut. Im südlichen Gebiet beteiligen sich außerdem sandig-tonige Gesteine des Tertiärs sowie kiesige Ablagerungen des Quartärs am Schichtaufbau (Fig. 2).

a) Oberer Jura (= Malm oder Weißer Jura)

In diesem Beitrag werden für die Schichten des Oberen Juras Bezeichnungen verwendet, die an die internationale Juragliederung angeglichen sind und die künftig auch auf den geologischen Karten eingeführt werden sollen. Die alten Bezeichnungen $w\alpha$ bis $w\zeta$ werden in Klammern angegeben.

Die Kalkformation des Oberen Juras erreicht eine Gesamtmächtigkeit von 300 bis 400 m. Als unterste Schicht folgen über dem Dogger die **Oxfordmergel** ox 1 (= Untere Malmmergel, $w\alpha$) mit etwa 50 m Mächtigkeit, die aus grauem Mergelstein mit eingelagerten Kalksteinbänken bestehen. Besonders in den oberen 10 bis 20 m häufen sich die Kalksteinbänke (Lochenschichten). Hydrologisch bedeutsam sind die schwarzgrauen, tonigen 1 bis 2 m mächtigen Glaukonitsandmergel an der Basis der Oxfordmergel. Über ihnen treten im nordwestlichen Hegau zahlreiche Quellen aus, die Wasser aus den darüber folgenden Oxfordmergeln und Oxfordkalken zutage bringen. Daraus ist ersichtlich, daß die Oxfordmergel nicht überall als Wasserstauer wirken, sondern durchgehend zerklüftet sein können.

Die **Oxfordkalke** ox 2 (= Wohlgeschichtete Kalke, $w\beta$) sind im Donauegebiet bei Immendingen 90 bis 100 m mächtig. Nach Osten nimmt ihre Mächtigkeit ab (40 m bei Nendingen nach G. HAFNER, 1969). Sie

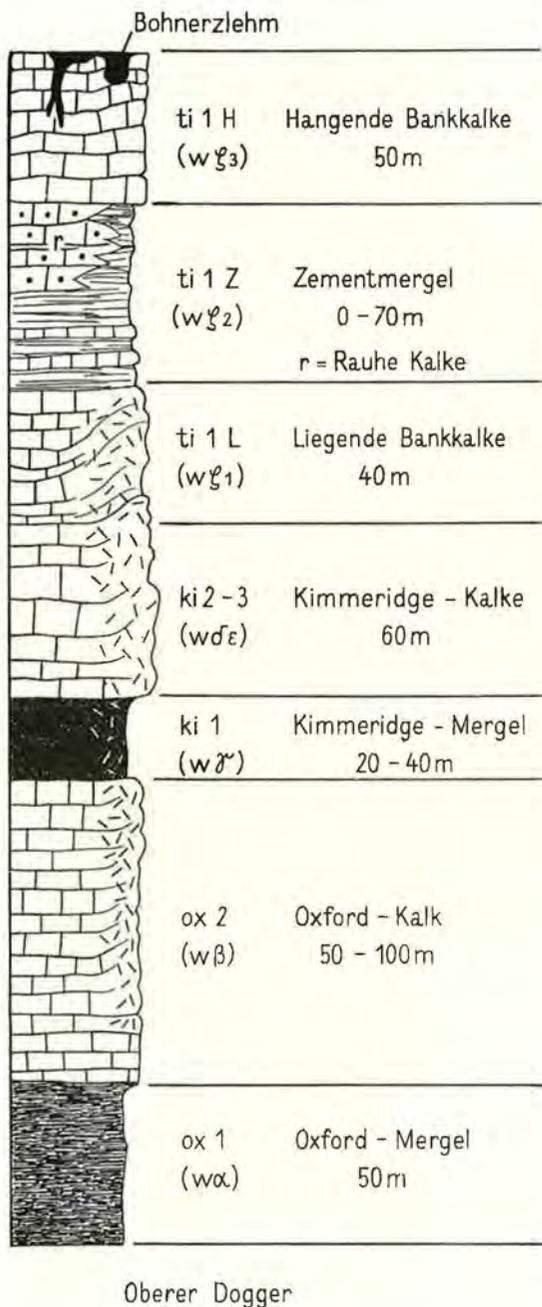


Fig. 2: Schichtaufbau des Oberen Juras (Weißer Jura). Die geschichtete Fazies geht besonders im östlichen Donau-Aach-Gebiet durch das Wachstum von Schwammriffen in Massenkalk über.



Fig. 3: Oxfordkalk ox 2 (wß), Steinbruch südlich Aulfingen. Regelmäßige Schichtung, enge Klüftung (Foto: A. SCHREINER, 1968).

bestehen aus einer mauerartig aufgebauten Folge von 10 bis 50 cm dicken Kalksteinbänken mit dünnen Mergelzwischenlagen (Fig. 3). Der Kalkstein ist grau bis weißgelb, homogen-feinkörnig und glattbrechend. Durch die im oberflächennahen Auflockerungsbereich engständige Klüftung sind die Oxfordkalke gut wasserdurchlässig. Im Berginnern zirkuliert Wasser fast nur an Störungszonen und besonders in Karstgerinnen. Die Hauptversinkung der Donau von Immendingen bis zum Brühl geht in den verkarsteten Oxfordkalcken vor sich. Besonders starke Zerklüftung und Verkarstung der Oxfordkalke sind in der Nähe der Immendinger Flexur und der Hattinger Verwerfung vorhanden.

Die **Kimmeridge-Mergel** ki 1 (= Mittlere Malmmergel, w γ) sind im Westen bei Immendingen nur 20 m mächtig und nehmen nach Osten auf 40 m zu (bei Mühlheim, nach G. HAFNER, 1969). Sie bestehen aus grauem Mergelstein, dem reichlich Kalksteinbänke, die an vielen Stellen als ruppig-knaueriger Schwammkalk ausgebildet sind, eingeschaltet sind. Bei ungestörter und mächtiger Ausbildung wirken die Kimmeridge-Mergel als Wasserstauer, und so kommt es an ihrer Obergrenze zum Austritt kleiner Quellen. Dabei mag auch die Verwitterung und damit die Verwandlung des Mergelsteins zu einem plastischen, dichten Mergel eine Rolle spielen. Tiefer im Berginnern ist der Mergelstein zumindest im Bereich von Störungszonen durchgeklüftet und

wasserdurchlässig, denn das im Oxfordkalk versickerte Donauwasser durchbricht auf seinem Weg zur Aachquelle die Kimmeridge-Mergel, wofür sich die vorhandenen Verwerfungszonen anbieten (Tafel II). Sehr wahrscheinlich gibt es aber neben den eingezeichneten noch weitere, kleine Verwerfungen, an denen ebenfalls Wasserdurchtritte möglich sind.

Kimmeridge-Kalke $ki\ 2-3$ ($w\delta + w\epsilon$). Als Kimmeridge-Kalke wird eine etwa 60 m mächtige, vorwiegend kalkige Schichtenfolge zusammengefaßt. Sie beginnt mit 15 bis 20 m dickbankigen, grauen bis weißen Kalken, denen noch reichlich Mergellagen zwischengeschaltet sind. Diese Ausbildung, auch als Quaderkalke bezeichnet, ist besonders im Donaugebiet von Immendingen bis Fridingen entwickelt. Über einer zwischen Mergellagen liegenden glaukonitführenden Kalkbank — der Glaukonitbank — folgen 15 bis 20 m fast mergellagenfreie, bis 1,5 m mächtige Bänke aus hellgrau-weißgelbem Kalkstein von inhomogener Struktur, die durch zahlreiche Partikel von verkalkten Schwämmen und anderen Organismen erzeugt wird. Stellenweise sind die Bankkalke in grobkristallinen, massigen, bräunlich-löcherigen „Zuckerkorn“-Fels umgewandelt (z. B. an der Steige Immendingen—Höwenegg). Ohne deutliche petrographische Grenze geht die Kalksteinfolge in den durch ihren Fauneninhalt gekennzeichneten, etwa 20 m mächtigen Oberkimmeridge-Kalk über (Subeumela- und Setatuszone). Dabei handelt es sich um gelbweißen, sehr reinen, mergellagenfreien Kalkstein in Bänken von 10 bis 50 cm Dicke.

Die Bankkalke des Kimmeridge sind zerklüftet und damit wasserdurchlässig. In Folgen mit dicken Bänken ist die Klüftung in der Regel weitständiger (2 bis 10 m) als in dünnbankigen Abschnitten (0,8 bis 2 m Kluftabstand). Die Mergellagen im unteren Teil der Kimmeridge-Kalke sind hydrologisch von Bedeutung, denn in wenig gestörtem Gebirge führen sie zur Wasserstauung und zur Ausbildung eines Quellhorizontes. So tritt zum Beispiel in der Thermalwasserbohrung Singen das Wasser in 555 m Tiefe über mergeligen Kalken des Kimmeridge in das Bohrloch ein. Im Donau-Aach-Gebiet sind die Kimmeridge-Kalke samt ihren mergeligen Lagen offensichtlich durchgeklüftet, denn sie werden wie die Kimmeridge-Mergel von dem versickerten Donauwasser nach oben durchflossen. Die Versinkungsstelle der Donau bei Fridingen befindet sich im unteren Teil der Kimmeridge-Kalke.

Liegende Bankkalke $ti\ 1\ L$ (Ulmensis-Schichten, $w\zeta\ 1$). Die etwa 40 m mächtigen Liegenden Bankkalke unterscheiden sich vom Liegenden durch die Einschaltung von Mergellagen zwischen den 10 bis 50 cm mächtigen Bänken des hellgrau-weißen, meist glatten Kalksteins. Bemerkenswert sind synsedimentäre Schichtstörungen (Brüche, Verschiebungen, Verfaltungen) und gradiert geschichtete Breccienbänke aus Kalksteinpartikeln. Die Liegenden Bankkalke sind klüftig und daher wasserdurchlässig. In hydrologischer Hinsicht kann man den

insgesamt etwa 100 m mächtigen, wasserdurchlässigen Kalksteinkomplex der Kimmeridge-Kalke und der Liegenden Bankkalke unter der Bezeichnung „Felsenkalke“ nach O. F. GEYER & M. GWINNER (1968, S. 70) zusammenfassen.

Zementmergel ti 1 Z (wç 2). Die Zementmergel sind eine bis 70 m mächtige Folge, die sich durch reichlich mergelige Schichten auszeichnet (Fig. 4). An der Basis liegen etwa 20 m mergelige Kalksteinbänke mit Mergellagen bis zu 2 m Dicke. Darüber folgen etwa 10 m, die über-



Fig. 4: Rauhe Kalke, Obere Zementmergel ti 1 Z (wç 2), Steinbruch am Schoren südöstlich Neuhausen bei Engen. Gestörte Lagerung durch synsedimentäre Störungen, durch tektonische Zerrüttung (rechts) und durch Verkarstung (Karsttasche mit Bohnerzlehm- und Sandfüllung in der Bildmitte (Foto: A. SCHREINER, 1968).

wiegend aus grauem Mergelstein bestehen. Die oberen 40 m werden im Gebiet Hattingen—Engen—Eigeltingen von einer vorwiegend kalkigen Folge eingenommen. Sie besteht bei Hattingen aus dickbankigem Kalkstein, der aus groben Trümmern von Muschelschalen, Echinodermen, Schwämmen und Kalkpartikeln besteht (Hattinger Trümmerkalke). Nach Süden und Osten nimmt die Korngröße der Trümmer ab, und bei Engen—Eigeltingen liegt eine Folge von grauen, körnigen Kalksteinbänken mit Mergellagen vor (Rauhe Kalke, A. SCHREINER, 1961). Im Gebiet Liptingen—Neuhausen ob Eck sind die Zementmergel vorwiegend mergelig ausgebildet.

Die Mergellagen besonders im mittleren Abschnitt der Zementmergel sind wasserstauend und bilden einen Quellhorizont, der besonders im Talmühletal nördlich Engen entwickelt ist. Infolge der starken Zertalung und des seitlichen Überganges in Massenkalk ist jedoch der Wasserhorizont über den Zementmergeln räumlich begrenzt. Beim Übertritt in den Bereich der Liegenden Bankkalk versinken die in den Zementmergeln ständig oder zeitweise fließenden Gewässer wieder.

Hangende Bankkalk ti 1 H (wç 3). Über den Zementmergeln folgt wieder eine kalkige Schichtserie, die Hangenden Bankkalk, von denen noch bis zu 50 m erhalten sind. Die Hangenden Bankkalk sind ähnlich regelmäßig gebankt wie die Oxfordkalk und bestehen ebenfalls aus feinkörnigem, glattbrechendem Kalkstein von hellgrauer bis weißgelber Farbe. Sie sind zerklüftet und wasserdurchlässig. Häufig sind die Klüfte von der Oberfläche her trichterförmig erweitert und mit Bohnerzlehm gefüllt.

Massenkalk-Fazies. Die im Vorhergehenden beschriebene geschichtete oder gebankte Ausbildung des Oberen Juras kann durch das Wachstum von Schwammriffen teilweise oder fast ganz in Massenkalk übergehen. Einzelne unregelmäßig verdickte Bänke oder kleine Riffe aus Schwammkalk kommen schon in den oberen Oxfordmergeln und im Oxfordkalk vor. Im Nordosten bei Fridingen sind diese Schichten überwiegend als Schwammkalk ausgebildet. In den Kimmeridge-Mergeln ist die Verschwammung schon weiter verbreitet, wobei besonders die kalkigen Partien, aber auch die Mergel von den tellerförmigen Schwämmen durchwuchert werden und im Gefolge davon ihre schichtige Struktur verlieren. In dem Kalksteinkomplex der Kimmeridge-Kalk und Liegenden Bankkalk umfaßt die Verschwammung große Teile des Donau-Aach-Gebietes, wofür die Felsen im Donautal bei Fridingen und im Wasserburger Tal als Beispiele genannt seien. Neben den gleichzeitig abgelagerten, geschichteten Kalken sind durch das Schwammwachstum Klötze und Riffe aus Massenkalk aufgewuchert, wobei die Mächtigkeit gegenüber der geschichteten Fazies in der Regel erheblich zunimmt. Der im Donautal bei Fridingen zu beobachtende faltenähnliche Schichtenbau ist also primär, denn er entstand durch den Wechsel von Schwammriffen und dazwischen liegenden Sedimentationsmulden (Fig. 5). Durch das Hochwachsen der Schwammriffe zur Zeit der Liegenden Bankkalk wurde das Areal der Zementmergel in geschichteter Fazies eingengt und im Gebiet vorherrschenden Massenkalks auf einige schüsselförmige Bereiche eingeschränkt. Ungefähr östlich der Linie Fridingen—Neuhausen o. E.—Eigeltingen sind auch die Hangenden Bankkalk als Massenkalk ausgebildet. In einer Bohrung bei Orsingen (L. ERB 1958) wurden 350 m Massenkalk und Schwammmergel, die von den Oxfordmergeln bis zu den Hangenden Bankkalk reichen, durchbohrt. Ein weiteres Massenkalkgebiet befindet sich bei Singen, denn in der Thermalwasserboh-



Fig. 5: *Tithon-Massenkalk, Steinbruch bei Schloß Langenstein östlich Eigeltingen. Rechts Massenkalk des ti 1 L. Daran angelagert und nach oben auskeilend Zementmergel ti 1 Z. Links oben Massenkalk vom Alter der Hangenden Bankkalke ti 1 H (Foto: A. SCHREINER, 1960).*

rung Singen wurden unter der Molasse 180 m Massenkalk, die den Kimmeridge-Kalken bis wahrscheinlich zu den Hangenden Bankkalcken entsprechen, durchteuft (A. SCHREINER 1967).

Der Massenkalk ist ebenfalls zerklüftet, wenn auch die Klüftung unregelmäßiger und meist auch weitständiger ist als in den Bankkalcken. Stellenweise, z. B. gerade über der Aachquelle, kommen nicht zerklüftete Massenkalkkomplexe von einigen Dekametern vor, die kein Wasser führen — eine Erscheinung, die bei Wasserbohrungen des öfteren festgestellt worden ist. Es kommt auch vor, daß vorhandene Klüfte durch Bohnerzlehm verstopft sind. Im großen gesehen ist der Massenkalk jedoch wasserdurchlässig.

b) Tertiär

Die Oberfläche des Juras wird von einer sehr lückenhaften Decke aus **Bohnerzlehm**, der im Alttertiär (Eozän) abgelagert wurde, bedeckt. Es ist ein rotbrauner bis gelbbrauner, kalkfreier Lehm, der vorwiegend aus Kaolinit mit Eisenoxiden besteht. In unterschiedlicher Menge sind

dem Lehm rundliche Konkretionen aus Eisenoxiden beigemischt. Der Bohnerzlehm liegt dem Jurakalkstein als 1 bis 5 m mächtige Decke in flachen Mulden, wie bei Liptingen, in trichterförmig erweiterten Klüften und in sackförmigen Hohlräumen auf. Der Bohnerzlehm wirkt wasserstauend, so daß sich in Mulden und Gruben, die durch den Abbau der Bohnerze entstanden sind, kleine Wassertümpel bilden, deren Auslauf jedoch beim Erreichen der nicht mit Lehm bedeckten Juraflächen im klüftigen Kalkstein versinkt.

Stellenweise, besonders am Grund von größeren Taschen, enthält der Bohnerzlehm feinen Quarzsand. Die durch Bohnerzlehm gekennzeichnete alttertiäre Oberfläche des Juras ist durch spätere Abtragung im Gebiet nördlich der Molassebedeckung stark verändert worden, und der Bohnerzlehm wurde vielerorts in Spalten und Karstgerinnen in tiefere Lagen gespült.

Über dem Oberen Jura oder, soweit vorhanden, über dem Bohnerzlehm folgen verschiedene Schichten der **Molasse**, die besonders südlich der Linie Engen—Volkertshausen—Meßkirch hydrologisch von Bedeutung sind, da sie die Kalke des Juras nach oben abdichten und somit die Verhältnisse eines bedeckten Karstes schaffen.

Die **Untere Süßwassermolasse**, die unterste Schicht der Molasse, besteht aus feinsandigem, graugelbem Mergel mit Sandsteinbänken. Die Mächtigkeit nimmt infolge des Abtauchens der Juraoberfläche rasch nach Süden zu und beträgt bei Volkertshausen wenige Meter, 4 km südlich, bei Beuren a. d. Aach, schon über 100 m. Das in dem Brunnen Beuren a. d. Aach mit 7 bis 9 l/s artesisch auslaufende Wasser kommt aufgrund seiner erhöhten Temperatur aus etwa 120 m Tiefe aus dem Jura (A. SCHREINER 1966, S. 116), was durch den hier beschriebenen Markierungsversuch bestätigt wurde. Es handelt sich also um einen Karstwasseraufbruch, der die im allgemeinen nicht durchlässige Untere Süßwassermolasse wahrscheinlich in einer klüftigen Störungszone (Friedinger Verwerfung) durchbricht und in dem hier vorhandenen Rinnenschotter hochsteigt, in dem es durch die Bohrung erschlossen wurde.

Weitere Stellen, an denen das Karstwasser aus dem Jura die Decke der Molasse durchbricht, sind nicht bekannt.

Nördlich der Linie Engen—Volkertshausen—Meßkirch liegen inselartige Erosionsreste aus Molasse auf dem Jurakalk. Neben mergelig-kalkigen Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse südlich von Emmingen o. E. sind es vorwiegend die gelbbraunen Kalksilte mit Geröllagen der älteren und jüngeren Juranagelfuh zwischen Höwenegg und Engen und um den Witthoh. Die aus Kalksteinbänken und Geröllagen dieser Schichten austretenden Quellen sowie das auf den schwer durchlässigen Flächen zusammenlaufende Oberflächenwasser versinkt nach Erreichen des nicht bedeckten Juras in dessen klüftigem Kalkstein.

c) Quartär

Die Ausbreitung des eiszeitlichen Rheingletschers erreichte den Südrand der Jurahochfläche und schuf durch Erosion von Schmelzwassergerinnen am Eisrand und auch durch die Ablagerung von Kies-Sand, Grundmoräne und Beckenton Bildungen, die hydrologisch von Bedeutung sind. Die Aachquelle liegt in dem tief in den Jura eingeschnittenen Eisrandtal Eigeltingen—Aach, das während des Zurückschmelzens des würmeiszeitlichen Gletschers von einem starken Schmelzwasserstrom durchflossen wurde.

Von Volkertshausen über Beuren a. d. Aach nach Singen und weiter nach Schaffhausen zieht sich 50 bis 60 m unter dem heutigen Aachtal eine alte, mit Rinnenschotter gefüllte Talrinne, die in der Rißeiszeit oder zu Beginn der Würmeiszeit ausgeräumt und gefüllt wurde (A. SCHREINER 1968). In der Würmeiszeit wurden die Rinnenschotter mit Grundmoräne, Beckenton und Rückzugsschotter bedeckt (Tafel II). Es ist wohl als Ausnahmefall zu betrachten, daß die Rinnenschotter wie bei Beuren a. d. Aach mit Karstwasser, das die abdichtende Molassedecke durchbricht, gespeist werden. Hingegen ist dort, wo eiszeitliche Kiese direkt dem Jura aufliegen, mit dem Eintritt von Karstwasser in die Kiese zu rechnen. Derartige Verhältnisse wurden durch den hier beschriebenen Markierungsversuch an Brunnenbohrungen und Quellen bei Engen und südlich davon nachgewiesen. Besonders erwähnt sei hierbei die Bohrung an der Bleichequelle, die aus einem 30 bis 47 m tiefen, auf Jurakalk aufliegenden Kieslager Wasser erschlossen hat, das mit 40 bis 60 l/s und +10° C artesisch überläuft. Sowohl der Überdruck als auch die große Menge weisen darauf hin, daß das Wasser größtenteils aus dem Jura kommt.

1. 1. 2. Lagerungsverhältnisse und Schichtstörungen

a) **Schichtfallen.** Das Hauptelement der Tektonik im Donau-Aach-Gebiet ist das Schichtfallen nach Südosten bis Süden. Von Immendingen an der Donau bis nach Aach neigen sich die Schichten des Juras um rund 300 m (2,5%). Die durch Bohnerzlehm gekennzeichnete Juraoberfläche fällt auf derselben Strecke um rund 200 m (1,7%), woraus abzuleiten ist, daß die Schrägstellung der Schichten schon im Alttertiär einen Betrag von etwa 0,8% erreicht hatte.

Wie aus der Schichtlagerungskarte (Fig. 6) zu ersehen ist, erfährt das allgemein nach Südosten gerichtete Schichtfallen besonders im Gebiet Immendingen-Engen und südlich davon eine Drehung in südliche und südwestliche Richtung.

Dem von zahlreichen tektonischen Störungen durchsetzten Gebiet um Engen steht das wenig gestörte Gebiet um Neuhausen o. E. gegenüber, was aber zum Teil daher rührt, daß die geologische Aufnahme der Blätter 1 : 25 000 Neuhausen o. E. und Eigeltingen noch aussteht.

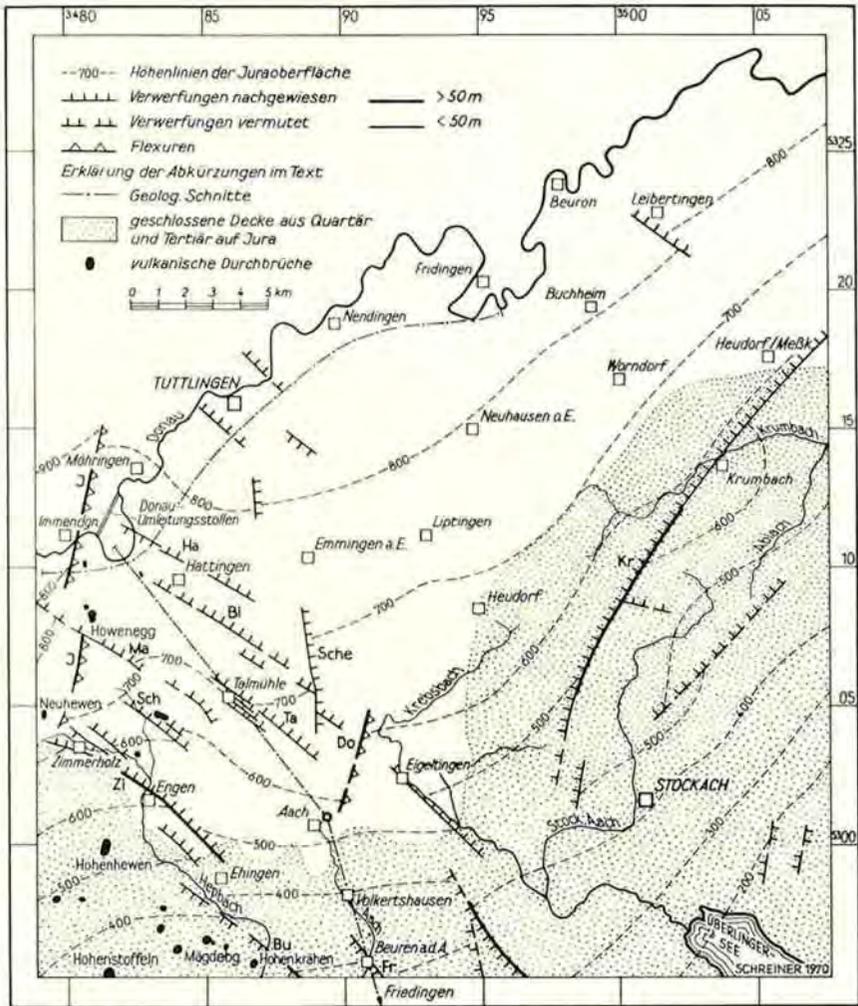


Fig. 6: Geologische Strukturskizze des Donau-Aach-Gebietes. Im Gebiet Neudingen-Fridingen nach G. HAFNER (1969), bei Leibertingen nach W. HAHN (1969), bei Krumbach nach J. WERNER (1966).

Die vorgenommene Darstellung der Höhenlinien der Juraoberfläche ist nur als grobe Annäherung ohne Berücksichtigung des Reliefs durch Schwammriffe und ohne Erosionseinschnitte gedacht.

b) **Störungen.** Von den Störungen seien hier diejenigen erwähnt, die im Bereich des Donau-Aach-Gebietes für die Verkarstung und unterirdische Entwässerung von Bedeutung sein dürften. (Die vorge-

stellten Abkürzungen beziehen sich auf die Strukturskizze Fig. 6.) Eine ausführliche Darstellung der Störungen findet sich bei A. SCHREINER (1970). Die zum größten Teil antithetischen, also gegen das Schichtfallen abschiebenden herzynischen Verwerfungen vermindern die Wirkung des Schichtfallens kaum, da der Verwerfungsbetrag meist durch verstärktes Schichtfallen noch in der Nähe der Verwerfung ausgeglichen wird.

[J] **Immendinger Flexur** (W. SPITZ 1930). An der Immendinger Flexur neigen sich die Juraschichten mit 80° entlang einer rheinisch gerichteten Störungslinie um rund 100 m nach Osten (Tafel II unten). Dadurch gelangen die Donau und das Grundwasser des Donautales aus den nicht durchlässigen Ton- und Mergelsteinen des Doggers und unteren Oxfords in die klüftigen und verkarsteten Oxfordkalke, die östlich der Flexur 80 bis 90 m unter die Talsohle absinken. Die Versinkungsstellen am Immendinger Wehr liegen im Bereich der Flexur. Das Grundwasser der 3 bis 5 m mächtigen Kies-Sandfüllung des Donautales fällt schon 200 m oberhalb der Flexur rasch ab und versinkt in dem abtauchenden Oxfordkalk. Auch die Versinkungsstelle Brühl liegt in der Tiefscholle östlich der Immendinger Flexur.

[Ha] **Hattinger Verwerfung**. 2 km nordwestlich Hattingen ist an der östlichen Flanke des Donautales eine Verwerfung festzustellen, an der die Kimmeridge-Mergel um 30 m nach Südwesten abgesenkt worden sind. Im weiteren Verlauf der Störung nach Südosten tritt eine Aufspaltung und Umkehr der Verwerfungsrichtung ein. Im Bereich des Donaulaufes und der daraus versinkenden Wässer bildet die Hattinger Verwerfung zumindest bei tiefem Stand des Karstwassers eine östliche Begrenzung für das versunkene Donauwasser, da die durchlässigen Oxfordkalke an der Verwerfung gegen die weniger durchlässigen Oxfordmergel anstoßen (Tafel II). Im Donau-Umleitungsstollen zwischen Immendingen und Möhringen waren in der Verlängerung der Hattinger Störung drei herzynisch gerichtete Verwerfungen von geringer Sprunghöhe, an denen der sonst ziemlich dichte Oxfordkalk leicht verkarstet und wasserführend war, zu beobachten. Die in Steinbrüchen bei Tuttligen aufgeschlossenen Verwerfungen sowie die von K. C. BERZ (1928, S. 27) beschriebene Verwerfung im Donautal östlich Tuttligen zeigen an, daß das in der Strukturskizze tektonisch „leere“ Gebiet zwischen Tuttligen und Fridingen ebenfalls von Störungen durchsetzt sein dürfte.

[Ta] Von den südlich von Hattingen folgenden herzynisch gerichteten Verwerfungen ([Ma] Mauener Verwerfung, [Sch] Schopflocher Verwerfung), die Sprunghöhen von 15 bis 30 m mit Abschiebung nach Nordosten aufweisen, dürften die **Talmühle-Verwerfungen** [Ta] hydrologisch von Bedeutung sein, da an ihnen der Durchtritt des Karstwassers aus dem Oxfordkalk durch die Kimmeridge-Mergel in die höheren Kalksteinschichten am ehesten möglich ist (Tafel II). Die Talmühle-Störung ist ein Bündel von vier Verwerfungen mit je 5 bis 30 m Sprunghöhe, die an dem Bahneinschnitt am Bahnhof Talmühle im Bereich der Rauhen Kalke aufgeschlossen sind.

[Zi] Die **Zimmerholz-Verwerfung** weist am Schoren südöstlich Engen einen Verwerfungsbetrag von 80 m auf. Die südöstliche Verlängerung zielt auf die Bitzenquelle.

[Sche] In der Umgebung der Aachquelle ist keine Verwerfung feststellbar.

Die Aachquell-Höhle verläuft nach J. HASENMEYER (1963, 1968) mindestens 300 m weit in nördlicher Richtung und folgt demnach einer Hauptklüftung des Gebietes. In dieser Richtung folgt 3 km weiter nördlich die **Schenkenberg-Verwerfung**, die um 40 m nach Osten verwirft.

[Do] An der **Dornsborg-Ostrandstörung** nordöstlich von Aach sinkt die Grenze Hangende Bankkalke/Rauhe Kalke rasch um 70 m vielleicht flexurartig nach Osten ab.

[Kr] Im Gegensatz zu den herzynisch und rheinisch gerichteten Störungen im Westen folgt am Ostrand des Donau-Aach-Gebietes die variskisch gerichtete **Krumbach-Verwerfung** (J. WERNER 1966) mit einer Sprunghöhe von 50 bis 100 m.

[Fr] Die **Friedinger Verwerfung** (Friedingen a. d. Aach, nicht zu verwechseln mit Fridingen a. d. Donau), die vielleicht zur Entstehung des Karstwasseraufbruches bei Beuren a. d. Aach beiträgt, hat eine Sprunghöhe von etwa 20 m. Westlich davon

[Bu] folgt die **Buchbergstörung**, an der die Juraoberfläche um 70 bis 90 m nach Südwesten absinkt. Vielleicht besteht zwischen der Bleichequelle sowie der benachbarten artesischen Bohrung ein Zusammenhang mit Störungen oder verstärkter Klüftung in der nordwestlichen Verlängerung der Buchbergverwerfung.

Die früher angenommene und in der geologischen Karte 1 : 200 000 eingetragene rheinische Verwerfung von östlich Neuhausen o. E. bis östlich Eigeltingen ist keine tektonische Störung, sondern die Faziesgrenze zwischen geschichteten Kalken im Westen und höher aufragenden Massenkalken im Osten. Ähnliches gilt für das in früheren Karten eingetragene tektonische Gitter um Fridingen, wo eine tief eingemuldete Zementmergelschüssel zwischen allseitig höher aufragenden Schwammriffen vorliegt (vgl. G. HAFNER 1969).

Aus der Reaktion der obermiozänen Juranagelfluhsedimentation auf Verwerfungen ist abzuleiten, daß der größte Teil der beschriebenen Störungen zu Beginn des Obermiozäns (Wende Helvet/Torton) kräftige Bewegungen erfahren hat. Aus der Verwerfung der höchsten erhaltenen obermiozänen Schichten am Schienerberg geht hervor, daß ein Teil der Bewegung gegen Ende des Obermiozäns und wohl noch im Pliozän stattgefunden hat. Außerdem liegen im Talmühletal nördlich Engen Verhältnisse vor, die wahrscheinlich machen, daß ein Teil der herzynischen Verwerfungen vortertiären Alters ist (A. SCHREINER 1966, S. 107).

Zusammen mit den Befunden über die schon vor und besonders während des Tertiärs ablaufende Einsenkung des Molassebeckens ergibt sich die Vorstellung kontinuierlicher tektonischer Bewegung mit örtlich und zeitlich wechselnden Höhepunkten. Aus der hohen Lage der pliozänen Donauschotter (900 m auf der Länge) und dem seitherigen Einschneiden des Donautales wird schließlich eine seit dem Pliozän anhaltende Hebungstendenz, von der fast das ganze Alpenvorland ergriffen wurde, sichtbar.

Der Verlauf und die Anordnung der Störungslinien dürften auf Strukturen beruhen, die aus dem variskischen Grundgebirge durchgepaust worden sind.

c) **Die Klüftung.** Es ist allgemein bekannt, daß die Verkarstung und unterirdische Entwässerung nicht so sehr von Verwerfungen als vielmehr von der Klüftung der Gesteinsschichten abhängig ist. Es kommt sogar vor, daß gerade starke Verwerfungen durch die Ausbildung von tonigem Mylonit oder von Gleitbrettern in der Verwerfungsfläche wasserabdichtend wirken können. Da aber in der Regel in der Nähe von Verwerfungen und Flexuren eine verstärkte Klüftung festzustellen ist, können die Störungslinien doch zu Zonen bevorzugter unterirdischer Entwässerung und Verkarstung werden.

Im Donau-Aach-Gebiet herrscht wie in ganz Süddeutschland (G. WAGNER 1958) ein Kluftsystem vor, das seine Kluftmaxima in der rheinischen Richtung (Nord-Süd) und etwas weniger stark in der Querrichtung (West-Ost) entwickelt hat. Außerdem ist besonders in der Nähe herzynischer Störungen noch ein drittes Kluftmaximum in der Südost-Richtung festzustellen.

Die Klüftung ist besonders im Bereich der Talhänge, wo die tektonische Klüftung und die Hangklüftung zusammenwirken, stark entwickelt. Daher versinken Wässer, die sich auf lehmigen Decken der Hochflächen noch halten können, auf jeden Fall beim Erreichen der stark geklüfteten Talhänge.

1. 1. 3. Verkarstung

Die Verkarstung tritt im Donau-Aach-Gebiet nicht so augenfällig in Erscheinung wie in den bekannten alpinen und dinarischen Karstgebieten, vor allem weil die Bodendecke und damit die Vegetation im Donau-Aach-Gebiet noch nicht angegriffen worden ist. Gleichwohl gibt es keinen Steinbruch, in dem nicht kleinere oder größere Verkarstungserscheinungen sichtbar sind, von geringfügig erweiterten, offenen oder mit Lehm erfüllten Spalten über röhrenförmige Karstgerinne bis zu 20 m durchmessenden, meist lehmgefüllten Taschen und 30 m tiefen Trichtern sowie gangförmigen Höhlen und Dolinenfeldern. Bei der Beschreibung der Jura-Schichtenfolge wurde schon auf die unterschiedliche Klüftigkeit der verschiedenen Schichten hingewiesen. Im folgenden seien einzelne Beispiele für Verkarstungsformen angeführt.

Geringfügig erweiterte Klüfte waren im Oxfordkalk beim Bau des Donau-Umleitungsstollens (Immendingen-Möhringen) im nördlichen, wenig gestörten Abschnitt des Stollens mehrfach sichtbar. Besonders im Bereich der hier durchziehenden herzynischen Verwerfungen von geringer Sprunghöhe (0,5 bis 2,0 m) waren Klüfte und Verwerfungsflächen zwickel- und linsenförmig erweitert (bis zu 10 cm) und führten zeitweise bis zu 20 l/s Wasser, das dem tiefer liegenden Karstwasser-



Fig. 7: Donau-Umleitungsstollen. Ortsbrust bei 1668 m, Oxfordkalk (weiß) ungestört, ohne Klüftung, ohne Verkarstung (rechts unten ein Pickel als Maßstab; Foto: A. SCHREINER, 1968).

körper zufließ. Größtenteils waren die Spalten mit ockergelbem Lehm verfüllt. Ähnliche Verkarstungsformen sind auch in den anderen Schichten des Oberen Juras verbreitet.

Röhrenförmige Karstgerinne sind aus dem Donau-Umleitungsstollen bekannt, wo im Bereich sonst ungestörter Oxfordkalke ein horizontales, rundliches Gerinne von 10 cm Durchmesser in den Stollen mündete und zeitweise ein Wasserstrahl von einigen l/s in den Stollen führte (Fig. 8). Häufiger waren senkrecht verlaufende, oft reihenförmig auf Klüften angeordnete Gerinne von linsenförmig bis ovalem Querschnitt im First des Stollens zu sehen. Ein senkrecht, röhrenförmiges Gerinne ist in den von Mergellagen durchsetzten Rauhen Kalken (Obere Zementmergel) 0,7 km nordwestlich von Talmühle aufgeschlossen. Die Schichten neigen sich hier mit 5° nach Südwesten und die Rinne steht senkrecht, ist also jünger als die Schrägstellung der Schichten.

Eine besondere Form der Verkarstung, die als „Sieb“ bezeichnet sei, war im stark gestörten südlichen Abschnitt des Donaustollens im Oxfordkalk zu beobachten: Mehrere Kalkbänke übereinander waren von dicht nebeneinander stehenden 2 bis 10 cm breiten, aus erweiterten

Klüften hervorgegangenen Karstgerinnen von rechteckigem bis linsenförmigem Querschnitt durchsetzt, so daß sich das Bild einer wie ein Sieb durchlöcherten Wand ergab. Die Mergellagen zwischen den Kalkbänken waren meist unversehrt. Bei weiterer Auflösung der Siebwände kommt es zum Zusammenbruch des Gebirges, was im südlichsten Abschnitt des Stollens verwirklicht war (Fig. 9). Hier mußte ein Haufwerk aus stark angelösten Kalksteinbrocken und braunem Lehm durchfahren werden. Das Überwiegen von stark angelösten Kalksteinbrocken in dem Haufwerk spricht dafür, daß nicht ein Nachsturz über einer größeren Höhle, sondern eher der Zusammenbruch einer durchsiebten Gesteinspartie vorliegt.

Stark erweiterte Klüfte und Ganghöhlen. Bis zu 2 m breit erweiterte und 30 m tiefe Klüfte, meist mit gelbbraunem Bohnerzlehm gefüllt, sind in allen Kalksteinschichten des Oberen Juras verbreitet und zur Zeit besonders in dem Steinbruch Lochmühle bei Eigeltingen in den Hangenden Bankkalken aufgeschlossen.

Im Donau-Umleitungsstollen waren im südlichen, stark gestörten Stollenabschnitt im Oxfordkalk mehrere bis 0,3 m unregelmäßig erweiterte Klüfte und zwei bis 1,5 m breite und 2,5 m hohe Ganghöhlen in



Fig. 8: Donau-Umleitungsstollen, 1624 m. Erweiterte Kluft im Oxfordkalk (Hammer als Maßstab, 40 cm lang; A. SCHREINER, 1968).



Fig. 9: Donau-Umleitungsstollen. Bruchzone bei 1800 m im Oxfordkalk. Die Schichtung neigt sich gegen die Bruchzone, diese besteht aus einem Haufwerk von korrodierten Kalksteinbrocken und Lehm. Bildbreite etwa 2 m (Foto: A. SCHREINER, 1968).

rheinischer und in 90°-Richtung aufgeschlossen. Die offenen Klüfte und Höhlen wiesen starke Auflösungserscheinungen und in einem Fall Versinterung mit Tropfsteinen auf (Fig. 10). Kleinere Ganghöhlen von 1 bis 2 m Breite und 10 bis 20 m Länge, die in rheinischer Richtung, also in der vorherrschenden Kluftrichtung, verlaufen, sind in den Hangenden Bankkalken südwestlich Aach und im Massenkalk (ti 1 L) des Bruderetales östlich Engen bekannt.

Eine typische Ganghöhle in nördlicher (rheinischer) Richtung ist auch die Aachquell-Höhle, die von J. HASENMEYER (1936, 1968) auf 300 m Länge nach Norden erkundet wurde. Nach seinen Berichten ist der Höhlengang 1 bis 3 m breit, bis 7 m hoch und weist Aufspaltungen und Versetzungen auf, wie es bei Klüften üblich ist. Die Aachquell-Höhle senkt sich vom Wasserspiegel des Quelltopfes aus zunächst 17 m schräg nach unten in die Tiefe. Nach Gesteinsproben, die von Sporttauchern mitgebracht wurden, bestehen die Wände der Höhlen aus stark korrodiertem, schartig-karrigem Kalkstein, der meist mit einer Schlammschicht bedeckt ist. Nach den geologischen Lagerungsverhältnissen verläuft die Aachquell-Höhle im Bereich der Liegenden Bankkalke. Die an der nörd-

lichen Wand des Quelltopfes sichtbaren oberen Enden der Ganghöhle liegen in geschichteter Fazies der Liegenden Bankkalke, darüber folgen Massenkalk und höhere Schichten des Thitons (Tafel II, oben).

Man kann sich vorstellen, daß die unterirdische Entwässerung zwischen Donau und Aach in erweiterten Klüften und Ganghöhlen, ähnlich wie sie vom Donau-Umleitungsstollen und der Aachquell-Höhle beschrieben wurden, abläuft. Durch den Zutritt von Wasser aus dem Einzugsgebiet zwischen Donau und Aach und durch die große vertikale Ausdehnung der zerklüfteten und verkarsteten Kalksteinplatte ergibt sich das Bild eines aus Klüften und Ganghöhlen zusammengesetzten und durch gebietsweise abdichtende Schichten untergliederten Hohlraumsystems, dessen Teile je nach Füllungszustand durchflossen werden oder trocken liegen.

Taschenförmige Karstgebilde. In Steinbrüchen im Bereich der Juraoberfläche sind taschenförmige Aushöhlungen des Kalksteins, die mit braunem Bohnerzlehm gefüllt sind, zu sehen (Steinbruch im Thiton-Massenkalk südöstlich Liptingen, Steinbruch Lochmühle nördlich Eigeltingen in den Hangenden Bankkalken). Die Taschen haben bis zu 20 m Durchmesser und Tiefe. Neben Bohnerzlehm, der in geringen Mengen

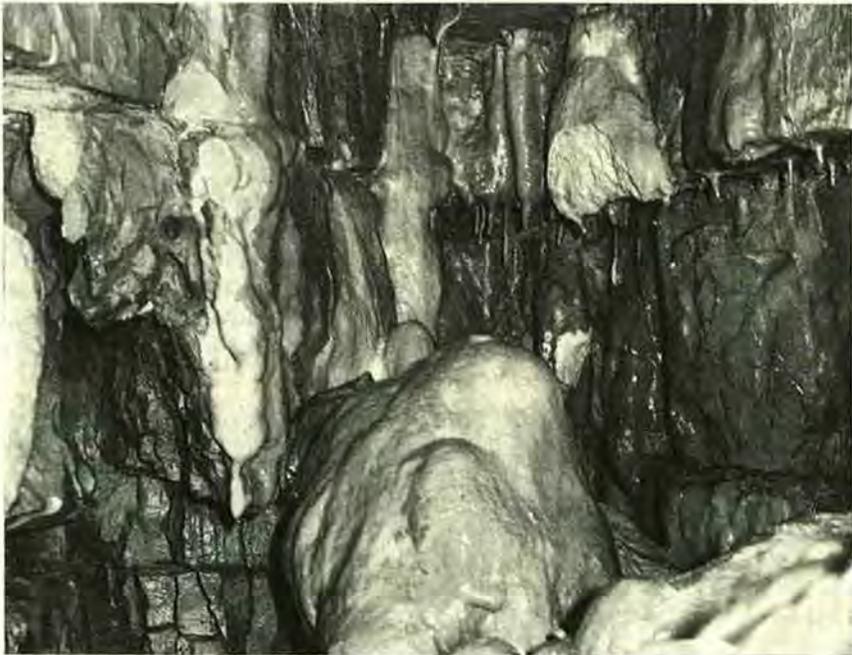


Fig. 10: Donau-Umleitungsstollen 1645 m. Ganghöhle im Oxfordkalk mit Tropfstein ausgekleidet (Foto: A. SCHREINER, 1968).

auch als weißer Kaolinit vorliegen kann, kommen in der Füllung auch Lagen aus weißem Quarzsand vor. An der Steige Immendingen-Höwenegg waren beim Straßenbau kugelige und unregelmäßige Karsthohlräume im Bereich der obersten Kimmeridge-Kalke und der Liegenden Bankkalke aufgeschlossen, wobei die Füllung teils aus gelbbraunem Lehm, teils aus Basalt und Basalttuff bestand (A. SCHREINER 1959).

Größere, hallenförmige Höhlen sind im Donau-Aach-Gebiet im Gegensatz zur Mittleren Schwäbischen Alb nicht bekannt. Der Petersfels im Brudertal östlich Engen und das außerhalb des Gebietes liegende Kesslerloch bei Thayngen, beides bedeutende Magdalénien-Stationen, sind hallenförmige Hohlräume in Thiton-Massenkalk mit mehreren großen Toren zum heutigen Tal, aber ohne Fortsetzung in das Berginnere. Hier dürften Nachbrüche und erosive Ausräumung durch Schmelzwasserströme in der Eiszeit an der Entstehung der Hohlformen beteiligt sein.

Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß auch im Donau-Aach-Gebiet durch Mischungskorrosion, durch Nachbruch oder durch Ausspülung lehmverfüllter älterer Hohlräume entstanden, größere Höhlen verborgen sind.

Dolinen, auf den topographischen Karten zum Teil als Erdfälle eingetragen, sind auf den Jurahochflächen südlich der Donau weit verbreitet. Es seien einige Beispiele erwähnt: Südöstlich von Immendingen sind 6 größere Dolinen bekannt, die in die aus Bankkalken des Oberen Kimmeridge und Unteren Tithon gebildete Hochfläche eingesenkt sind. Davon hat die Doline bei Talmannsberg eine Länge von 180 m, und das Gefallene Loch, das angeblich vor 150 Jahren eingebrochen sein soll, wurde von K. ENDRISS bis in 20 m Tiefe ausgeräumt (nach W. SPITZ 1930, S. 88), wo man auf eine mächtige Felsbank stieß. Ein Durchbruch bis zu dem 100 m tieferen Donau-Aach-Gewässer war weder im Gefallenen Loch noch in den anderen Dolinen dieses Gebietes festgestellt worden. Man gewinnt den Eindruck, daß die Dolinen der Jurahochfläche Einbrüche über einer alten, wohl alttertiären Verkarstung sind und nicht direkt mit der zweifellos jüngeren, pleistozänen Verkarstung des Donau-Aach-Gewässers zusammenhängen. Diese Ansicht wird auch durch die Basaltfüllung einiger Karsthohlräume südöstlich Immendingen unterstützt. Es ist aber denkbar, daß der Einbruch der Dolinen, der in den vergangenen Jahrhunderten und bis heute geschah, durch die Wiederausräumung der Lehmfüllung von alten Hohlräumen verursacht wurde, und die Ausspülung der Lehmfüllung und Abfuhr des Lehms hängt zweifellos mit der hydrologischen Wirksamkeit des Donau-Aach-Gewässers zusammen.

Ein weiteres Dolinengebiet befindet sich auf der Hochfläche südlich und östlich von Liptingen-Neuhausen ob Eck in Hangenden Bankkalken und Massenkalk. Auch hier finden bis in jüngste Zeit kleinere Einbrüche statt. In vielen Fällen ist heute nicht mehr zu entscheiden, ob

Dolinen oder Bohnerzgruben vorliegen. Zahlreiche Dolinen, die im Wiesen- und Ackerland eingebrochen sind, wurden wieder verfüllt.

In dem Trockental Einöde, das von Hattingen nach Nordwesten zum Versickerungsgebiet der Donau verläuft, ist der Talboden durch mehrere Einsenkungen und Dolinen stark gestört, und beim Bau der Eisenbahnbrücke über das Einödetal stieß man bei der Gründung der Brückenpfeiler auf Hohlräume und Versturzmassen in den Oxfordkalken, ähnlich wie im südlichen Abschnitt des Donau-Umleitungsstollens. Es ist offensichtlich, daß diese tiefliegenden Einbrüche unmittelbar mit der Verkarstung im Zuge des Donau-Aach-Gewässers zusammenhängen.

Die bisher beschriebenen Verkarstungserscheinungen im Bereich der Jurahochfläche greifen einige Dekameter unter die Oberfläche. Der Tiefgang des Donau-Aach-Gewässers ist nicht bekannt. Es ist jedoch möglich, daß im Versinkungsgebiet an der Donau erweiterte Klüfte und Gerinne bis zur Sohle des Oxfordkalkes, also etwa 90 m tief, durchflossen werden.

In der Thermalwasserbohrung Singen wurde 605 bis 645 m tief unter der heutigen Oberfläche (= 229 bis 269 m unter der Juraoberfläche) im Bereich der Oxfordkalke eine Spalte durchbohrt, die mit Kaolin und Kalkspat erfüllt war (A. SCHREINER 1967). Vermutlich liegt hier eine im Alttertiär gebildete, sehr tief reichende Karstfüllung an einer Störungszone vor.

Der an die Nähe der Juraoberfläche gebundenen und meist mit Bohnerzlehm verfüllten alten Verkarstung steht eine junge Verkarstung gegenüber, die sich 100 bis 200 m unter der Juraoberfläche abspielt und auf die tiefe Vorflut der heutigen Taleinschnitte eingestellt ist. Für die alte Verkarstung steht der gut 100 Millionen Jahre überdauernde Zeitraum zwischen der Landwerdung der Juraschichten am Ende der Jurazeit und der Wiedereindeckung der abgetragenen, verkarsteten und mit Bohnerzlehm infiltrierten Juraoberfläche mit Molasse-schichten im Mittleren Tertiär (Oberoligozäne Untere Süßwassermolasse) zur Verfügung. Da die Wirbeltierfunde im Bohnerzlehm vorwiegend auf eozänes Alter verweisen, spricht man vereinfachend von alttertiärem Alter der Bohnerzbildungen und der alten Verkarstung.

Zu der jungen Verkarstung gehört das vorwiegend aus erweiterten Klüften und Ganghöhlen bestehende Hohlraumssystem des unterirdischen Donau-Aach-Gewässers, wobei selbstverständlich die alte, hochliegende Verkarstung mitbeteiligt und durch Ausspülung und erneute Korrosion verjüngt und erweitert wird. Die junge Verkarstung fällt zeitlich mit der Eintiefung der Donau und der Nebenflüsse des Rheins im Hegau, die im Pliozän begann und ihren Höhepunkt zur Zeit der tiefen Rinnen im jüngeren Pleistozän erreichte, zusammen. Dazu ist zu bemerken, daß die Verkarstung während der Kaltzeiten durch tiefen Bodenfrost außer Funktion war.

Trockentäler. Eine bedeutende Karsterscheinung des Donau-Aach-Gebietes sind Täler, die heute dauernd oder überwiegend wasserfrei sind, weil ihr Wasser im klüftigen Kalksteinuntergrund versickert. Dazu gehören alle Täler, die nach Norden der Donau zufließen. Sie sind 150 bis 200 m tief eingeschnitten. Das längste ist das 7 km lange im Oberlauf stark verzweigte Seltenbachtal von Emmingen a. E. bis Tuttlingen, das bei Schneeschmelze und gefrorenem Boden erhebliche Hochwässer nach Tuttlingen bringen kann.

Von den nach Süden, dem Bodensee und Rhein zufließenden Tälern sind das Talmühletal mit seinen zahlreichen Nebentälern und das Wasserburgertal als größere Trockentalsysteme zu erwähnen, die bis zum Eintritt in die wasserführende Tertiär-Quartär-Bedeckung 9 bis 10 km lang sind. Der Oberlauf der Täler verläuft meist in mergelig-toniger Juranagelfluh und ist daher wasserführend. Daraus abgeschwemmter Lehm erzeugt in den Tälern eine teilweise Abdichtung, so daß die Bäche noch einige Kilometer weit in das Juragebiet hinein Wasser führen und es nur allmählich verlieren. Auch dort, wo die Talsohle über mergeligen Schichten der Zementmergel verläuft, führen die Bäche zumindest im Frühjahr Wasser (Kriegertal, Biertal, Schenkenbergertal).

Im Talmühletal wurde bei der künftigen Autobahnbrücke 2 km nördlich Engen durch Bohrungen festgestellt, daß das Tal zu Beginn der Würmeiszeit 25 m tiefer eingeschnitten war als heute. Die Talfüllung besteht aus folgenden Schichten:

- 5 m Kies und Lehm aus Jurahangschutt und einzelnen alpinen Geröllen.
- 12 m Bänderton, grau, siltig. Ablagerungen aus einem Gletscherstausee zur Zeit der Würmendmoräne, die nördlich von Engen das Tal abriegelte.
- 25 m Kies, Sand und Lehm aus Jurahangschutt und einzelnen alpinen Geröllen, wahrscheinlich im Verlauf des würmeiszeitlichen Eisvorstoßes abgelagert. Darunter folgt dickbankiger Kalkstein des mittleren Kimmeridge (ki 2).

Mehrere Vorkommen von rißeiszeitlichen Schottern und Moränen, die im Talmühletal bis zur heutigen Talsohle herabreichen, belegen, daß dieses Tal schon in der Rißeiszeit tief eingeschnitten war (A. SCHREINER, 1966). Dasselbe ist auch für andere Trockentäler in ähnlicher Lage, z. B. das Wasserburger Tal, anzunehmen.

Die Ausräumung der Trockentäler, die bis zu 200 m tief in die Jurafläche eingeschnitten sind, konnte nicht unter den heutigen hydrologischen Verhältnissen, sondern nur durch Flüsse mit zeitweise starker Wasserführung geleistet werden. Dafür kommen vornehmlich die Kaltzeiten des Pleistozäns in Betracht, wenn in den sommerlichen Tau-perioden die oberen Lagen des tiefgefrorenen Untergrundes auftauten und mit Schutt beladene Hochwässer durch die Täler strömten. Außer-

dem ist es möglich, daß die Verkarstung früher noch nicht so entwickelt war wie heute, daß also die Täler auch in den Warmzeiten zumindest zeitweise mehr Wasser führten als heute.

Eine Besonderheit sind die in Ost-West-Richtung verlaufenden Trockentäler zwischen Eigeltingen und Engen: Das Kohltal zwischen dem Krebsbach und dem Wasserburger Tal, das Trockental Eigeltingen-Aach, in dem die Aachquelle austritt, und das Brudertal zwischen Wasserburger Tal und Engen. Es sind Täler, die in der Eiszeit, als der Gletscher an ihrem südlichen Rand lag, von dem am Eisrand entlang fließenden Schmelzwasserstrom ausgeräumt wurden. Die große Wassermenge war imstande, in verhältnismäßig kurzer Zeit — vielleicht einige 100 Jahre — die Täler auszufurchen. Beim nächsten Zurückschmelzen des Gletschers nahm der Schmelzwasserstrom einen tieferen und weiter südlich gelegenen Weg, und das vorher benutzte Tal fiel trocken und wurde teilweise mit Hangschutt verfüllt.

Das Alter der Aachquelle. Als jüngstes Alter für die Aachquelle ist das Freiwerden des Eisrandtales Eigeltingen-Aach im Stadium 5 des würmeiszeitlichen Eisrückzuges vor etwa 16 000 Jahren anzunehmen. Es ist jedoch möglich, daß auch das Tal bei Aach, ähnlich wie das Talmühletal nördlich Engen, schon in der Rißeiszeit bis zur heutigen Talsohle eingetieft war und damit die Spalte der Aachquelle freien Ausfluß hatte. Demnach könnte der Austritt der Aachquelle schon vor etwa 100 000 Jahren begonnen haben. Dazu wird angenommen, daß sich das unterirdische Hohlraum- und Entwässerungssystem mit der im Pleistozän fortschreitenden Eintiefung des Donautales und der Täler im Hegau entwickelt und erweitert hat.

Im einzelnen ist nicht bekannt, wie tief das Tal bei der Aachquelle eingeschnitten war. Es ist durchaus möglich, daß wie im Talmühletal eine 10 bis 20 m mächtige, an ihrer Basis frühwürmeiszeitliche Tal-füllung aus Kies und Moräne vorhanden ist. Die 17 m unter der Wasseroberfläche der Aachquelle hinabreichende Quelhöhle ist als Hinweis in dieser Richtung zu betrachten.

1. 1. 4. Morphogenetischer Überblick

Die Morphologie des Donau-Aach-Gebietes wird überwiegend von der Abtragung, die das Gebiet seit dem mittleren Pliozän beherrscht, bestimmt. Nach dem Abschluß der Molassesedimentation, die bis in das Untere Pliozän dauerte und das Alpenvorland bis zum Südrand der Schwäbischen Alb bis zur heutigen Höhe von etwa 900 m verfüllte, bildete sich in der Tiefenlinie zwischen der nach Südosten geneigten Albfläche und dem nach Norden geneigten alpinen Molasseschuttfächer der Lauf der pliozänen Aare-Donau heraus. Deren Schotterreste sind auf der Jurahochfläche neben der Aitrach und Donau in 800 bis 900 m Höhe zu finden und bis nach Ulm zu verfolgen (O. MANZ, 1934). Noch während des Pliozäns tiefte sich die Donau in den Jura ein, denn verlassene Tal-

stücke mit Schottern, die man ins Jungpliozän bis Altpleistozän stellen kann, finden sich 100 bis 150 m tiefer (z. B. bei Thiergarten nach W. HAHN, 1969, S. 39).

In das Altpleistozän fällt wahrscheinlich auch die Umlenkung des Alpenrheins, der bis dahin noch nach Norden zur Donau floß, nach Westen zum Hochrhein. Damit wurde die Erosionsbasis für das Bodenseegebiet um etwa 200 m tiefer gelegt und die Wassermenge des Hochrheins stark erhöht, woraus zusammen mit den besonderen Erosionsleistungen des eiszeitlichen Klimas eine beschleunigte Abtragung und Tiefenerosion im Hochrhein-Hegau-Bodensee-Gebiet resultierte. Vom Altpleistozän bis zum Jungpleistozän wurde die Rheinrinne bei Singen um 350 m eingetieft, und in deren Einzugsgebiet, also auch im Hegau und am Südrand der Jurahochfläche, griff die Abtragung in ähnlichem Ausmaß in die Tiefe. Auf diese Weise schnitten sich die Nebenflüsse des Rheins rascher und tiefer ein als die Donau, deren frühere Quellflüsse in den Alpen (Aare) und im Schwarzwald (Wutach) nach und nach an den Rhein verlorengingen. Dieser flußgeschichtliche Vorgang ist auch die Voraussetzung für die Donauversinkung und für die Aachquelle, denn durch ihn wurde die Höhendifferenz zwischen der Donau bei Immendingen (657 m) und dem Tal bei Aach (475 m) geschaffen, die wiederum die Ausbildung des unterirdischen Hohlraum- und Gewässersystems ermöglichte.

Bei der fortschreitenden Abtragung wurden ältere morphologische Elemente, z. B. die im Alttertiär gebildete Juraoberfläche, wieder freigelegt (Bohnerzlehmfächen südlich Hattingen-Biesendorf und bei Lipzingen). Verschieden harte Gesteinsschichten gaben Veranlassung zur Herausarbeitung von Schichtstufen und der Kegelberge des Hegaus mit ihren Kernen aus Basalt und Phonolith. In der Eiszeit wurden die Talrinnen durch den Gletscher ausgeweitet und im Bodenseegebiet vertieft. In der Würmeiszeit wurden die vorher vorhandenen Tiefrinnen wieder teilweise mit bis 60 m mächtigen Schottern, Moränen und Seeablagerungen verfüllt. Am Eisrand wurden Endmoränenwälle abgelagert, und die Schmelzwässer furchten Eisrandtäler aus.

1. 2. Zur Hydrologie des Donau-Aach-Gebietes (H. HÖRZL)

Die westliche Schwäbische Alb gehört dem rheinischen und danubischen Stromsystem an. Die enge Verzahnung beider ist gekennzeichnet durch die fortdauernde Anzapfung des Einzugsbereiches der oberen Donau durch die Rheinzuflüsse. Das sichtbarste und wohl schönste Beispiel der engen Beziehung beider Stromgebiete ist der Wiederaustritt des bei Immendingen und Fridingen versickernden Donauwassers in der zum rheinischen Flußgebiet gehörenden Aachquelle im Hegau.

Zur Erläuterung dieses unterirdischen Entwässerungssystems wird im nachfolgenden besonders auf die Hydrogeologie und den Chemismus der Grundwässer des in Fig. 25 dargestellten weiteren Donau-Aach-Bereiches eingegangen. Die Ausführungen beruhen im wesentlichen auf der vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe in den Jahren 1965 bis 1969 in der westlichen Schwäbischen Alb durchgeführten Quellaufnahme. Das Ziel war eine quantitative Klassifizierung der Quellwässer auf Grund ihrer physikalischen und chemischen Kennwerte unter Berücksichtigung von lithologischen Gesichtspunkten. Über die Ergebnisse wird noch an anderer Stelle berichtet werden. Die Untersuchungen bildeten auch einen wichtigen Bestandteil für den im August 1969 durchgeführten vergleichenden, karsthydrologischen Markierungsversuch; sie stellten insbesondere die Grundlage für die Planung des Versuches dar.

Das auf Fig. 25 dargestellte Gebiet hat in SW-NE verlaufenden Streifen von Norden nach Süden Anteil an den Naturräumen der Baaralb und des Donautales, der Hegaualb und der Hegausenke.

1. 2. 1. Hydrographische Übersicht

Das Entwässerungssystem der Schwäbischen Alb ist gekennzeichnet durch eine äußerst geringe Flußdichte. Es ist dies eine Folge der weitgehenden Verkarstung der Landschaft und der damit verbundenen, vorwiegend unterirdischen Entwässerung. Davon betroffen ist besonders der Einzugsbereich der Donauzubringer. So hat die Donau im untersuchten Abschnitt, abgesehen von der im Westen bei Kirchenhausen einmündenden Aitrach, keine weiteren rechtsseitigen Zuflüsse. Der nächste bedeutende Zubringer ist die fast genau 100 km flußabwärts einmündende Ablach.

Von Norden laufen der Donau mehrere Bäche zu. Ihr oberirdisches Entwässerungsnetz weist aber nur wenige Verzweigungen auf. Die linksseitigen Zubringer sind der Amtenhauserbach bei Zimmern, der Weißenbach bei Immendingen, der Krähenbach bei Möhringen, die Elta bei Tuttlingen, der Kesselbach bei Stetten, der Lipbach und der Wulfbach bei Mühlheim sowie die Bära bei Fridingen. Das Einzugsgebiet umfaßt zusammen ca. 350 qkm.

Die mittlere Wasserführung der Donau unterhalb von Kirchenhausen, das ist unmittelbar nach Eintritt in das näher untersuchte Gebiet, beträgt einschließlich der Aitrach 11,9 cbm/s¹). Das dazugehörige Einzugsgebiet umfaßt 764 qkm. Der Jahresgang der Donau wird bestimmt durch die Niederschlagsverhältnisse im Schwarzwald. Dort herrschen Winterregen vor, die im Zusammenhang mit der Schnee-

¹) Diese und die folgenden Abflußangaben sind dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch, Sonderheft Land Baden-Württemberg, für das Abflußjahr 1966 entnommen.

schmelze zu einem maximalen Abfluß im Monat April führen. Der Tiefstand wird im August erreicht und hält meist bis zum Oktober an. Im Raum Donau-Aach sind dagegen die Sommerregen von größerer Bedeutung. Auf das Regime der Donauzuflüsse wirken sie sich jedoch weniger deutlich aus, da im Sommer die Verdunstung eine größere Rolle spielt. Das Abflußmaximum der nördlichen Donauzubringer fällt, bedingt durch die Schneeschmelze, in die Monate Februar bis April.

Der südliche Teil des untersuchten Gebietes, die Hegaulb und der Hegau, werden durch die Stockacher Aach mit dem Krebsbach, durch

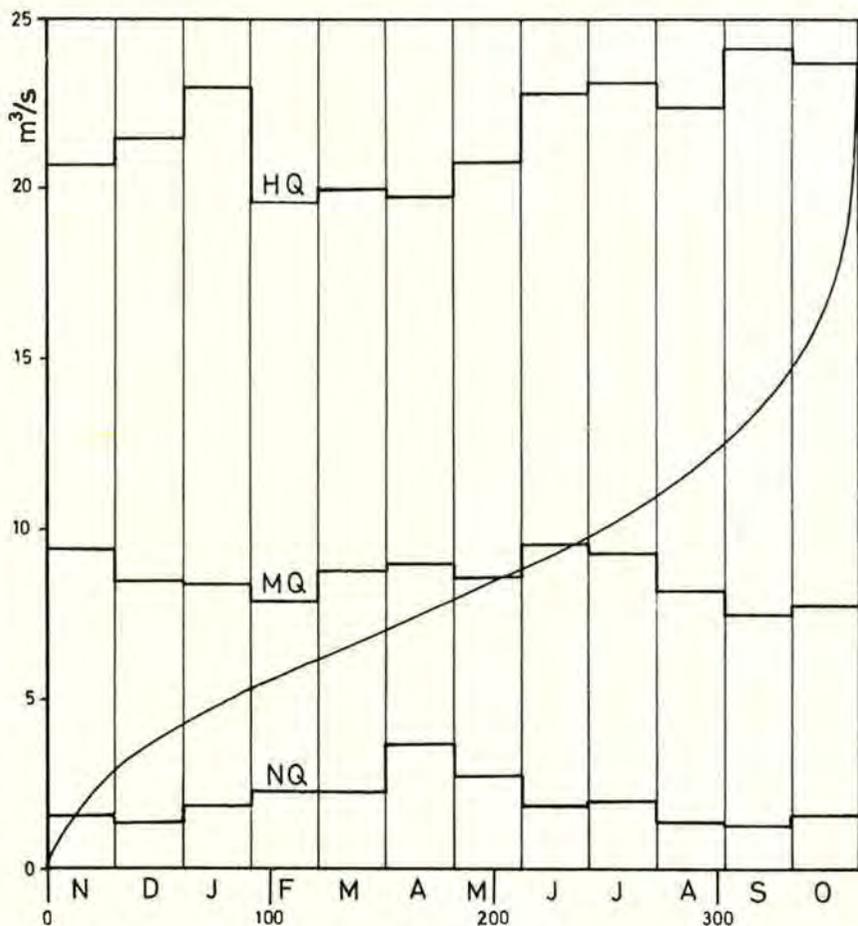
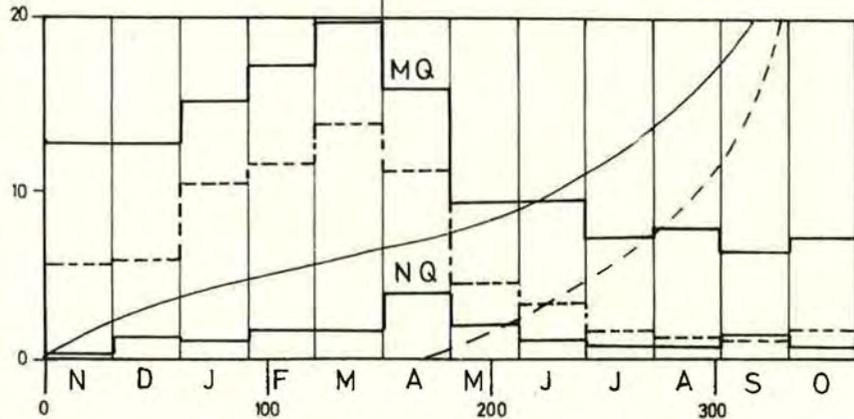
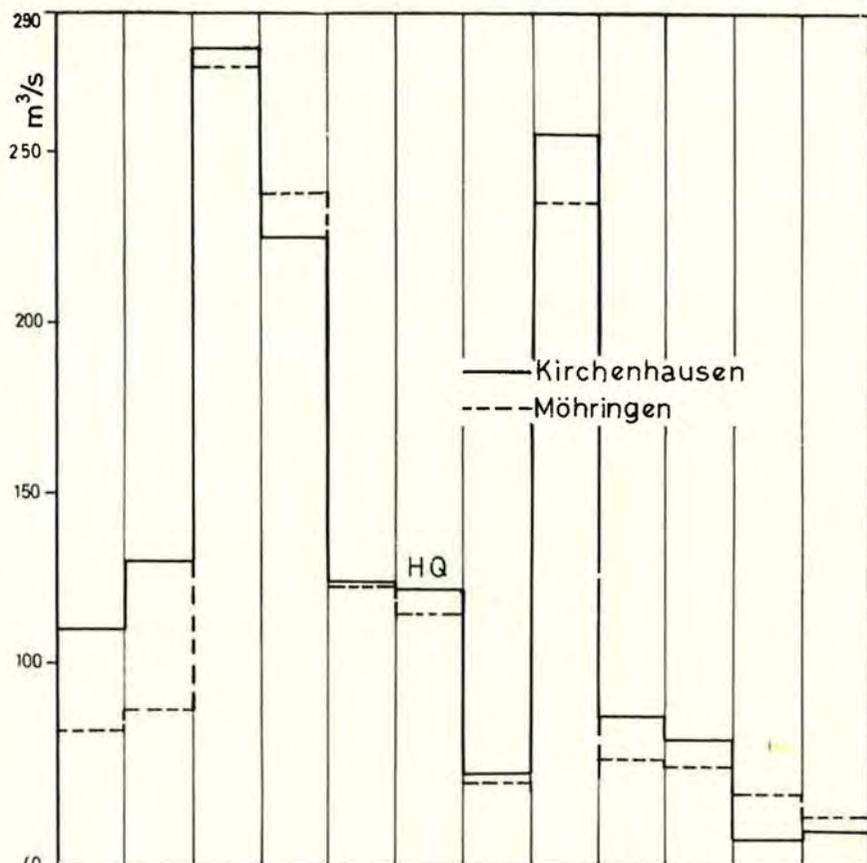


Fig. 11: Die Wasserführung der Aachquelle in langjährigen Monatsmitteln (1923—1965). Eingetragen ist die Abflußdauerlinie.



die Radolfzeller Aach mit dem Saubach, der im Mittellauf Hepbach und im Oberlauf Talbach genannt wird, sowie durch die Biber im westlichen Teil entwässert. Von Interesse ist jeweils nur das obere Einzugsgebiet der genannten in den Bodensee bzw. Rhein mündenden Wasserläufe. Folgende mittlere Jahresabflüsse wurden beobachtet:

	Pegel	beob. Zeitraum	F in qkm	MQ in cbm/s
Stockacher Aach	Wahlwies	1939—65	211	1,75
Radolfzeller Aach	Singen	1937—60	193	9,5
Biber	Ramsen	1928—61	162	1,17

Besonders auffallend ist hierbei die relativ starke Wasserführung der Radolfzeller Aach. Ihr Wasser entspringt zum Großteil aus dem Aachtopf bei der Stadt Aach im Hegau. Dieser gilt als die größte Quelle Deutschlands. Sie hat eine mittlere Schüttung von 8,8 cbm/s und zeichnet sich durch einen sehr gleichmäßigen mittleren Jahresgang aus (s. Fig. 11). Der bisher höchste jemals festgestellte Abfluß (HHQ) betrug 24,1 cbm/s. Das oberirdische Einzugsgebiet umfaßt 9,5 qkm, doch besagt diese Zahl bei der weitgehend verkarsteten Landschaft nur wenig. Für den unterirdischen Einzugsbereich wird man je nach Karstwasserstand eine Größe von 250 bis 350 qkm annehmen müssen.

Ein wesentlicher Teil des in der Aachquelle zutage tretenden Wassers geht auf die Donauversickerung zwischen Immendingen und Möhringen sowie unterhalb von Fridingen zurück. Die Wasserverluste der Donau unterhalb von Immendingen sind so groß, daß das Donaubett bei geringer Wasserführung völlig trocken fällt. Dies tritt besonders häufig während der Monate August bis Oktober ein. Als Vergleichsmaß für die Zu- bzw. Abnahme der Versickerung wird in der älteren Literatur vielfach die Zahl der Vollversickerungstage pro Jahr angeführt (s. Fig. 13). Die Zahl gibt jedoch keinen Anhaltspunkt über das genaue Ausmaß der Wasserverluste, da die Vollversickerung im wesentlichen von der Wasserführung abhängig ist.

Der tatsächliche Versickerungsbetrag errechnet sich jeweils aus der Differenz der Abflüsse bei den Pegeln Kirchen-Hausen und Möhringen (s. Fig. 12) bzw. bei Fridingen und Beuron, zuzüglich 4% für die Abflüsse bei Kirchen-Hausen für das Einzugsgebiet zwischen den Pegeln Kirchen-Hausen und Möhringen. Bei einem langjährigen Mittelabfluß von 11,9 cbm/s beim Pegel Kirchen-Hausen und von 6,1 cbm/s bei Möhrin-

Fig. 12: Die Wasserführung der Donau bei den Pegeln Kirchen-Hausen ($F_n = 746$ qkm) und Möhringen ($F_n = 833$ qkm) in langjährigen Monatsmitteln (1950—1965 bzw. 1923—1965). Die Abflußdauerlinie des Pegels Möhringen ist durch die Zahl der mittleren Vollversickerungstage pro Jahr gekennzeichnet, die NQ -Werte dieses Pegels sind gleich Null.

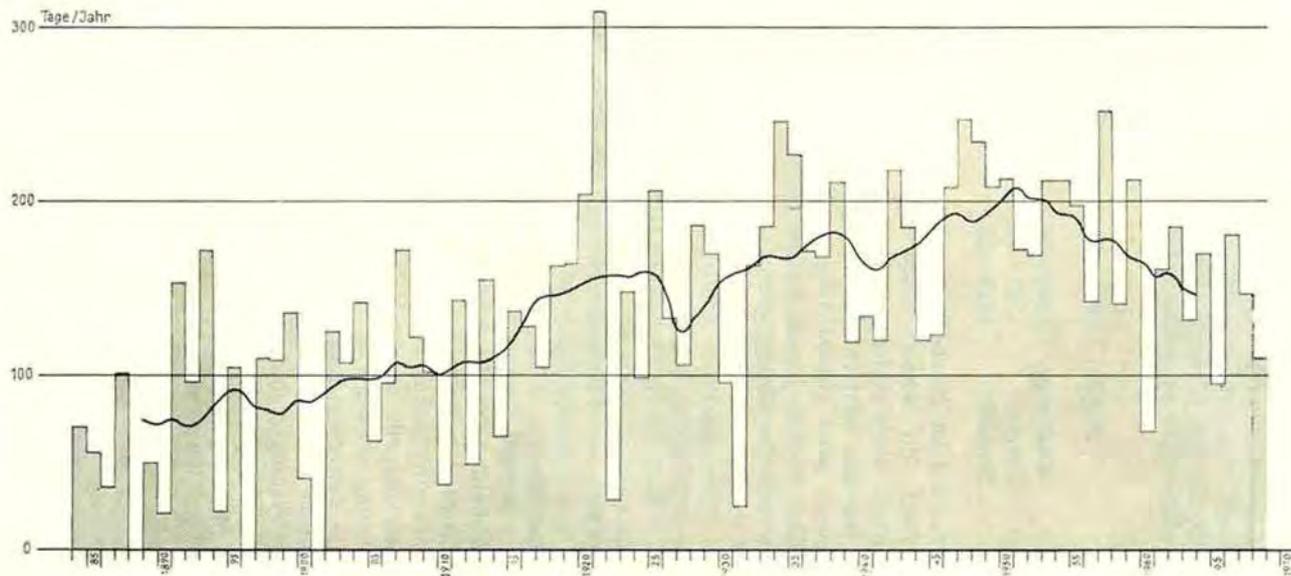


Fig. 13: Vollversickerungstage der Donau zwischen Immendingen und Möhringen 1884 bis 1968 mit der Verbindungslinie der zehnjährigen Mittel (nach R. PANTLE 1955, ergänzt durch W. KÄSS 1969).

gen erhält man für den Bereich Immendingen eine mittlere jährliche Versickerung von 5,8 cbm/s. Für Fridingen ist das langjährige Mittel relativ unbrauchbar, da sich der Mehr- bzw. Minderabfluß bei Beuron ungefähr ausgleichen. W. TÜRK (1932) errechnete im Mittel 0,09 cbm/s. Er nimmt ferner, ebenso wie schon K. C. BERZ (1928), an, daß im Abschnitt von Tuttlingen bis Fridingen weitere 1,5 cbm/s zum Teil direkt aus der Donau, zum Teil aus dem Grundwasser der Talschotter zur Aach hin abfließen.

Die Schluckfähigkeit der Versickerungsstellen kann beträchtlich schwanken. Sie hängt im wesentlichen von klimatischen und hydraulischen Faktoren ab (W. TÜRK 1932, L. ERB 1952, K. SCHMIDT 1961). Eine Berechnung des Wasserhaushaltes des Donau-Aach-Systems könnte beim derzeitigen Stand unserer Kenntnisse nur zu einer Annäherung führen, da einerseits das genaue Einzugsgebiet und der Verbleib des gesamten versickernden Donauwassers nicht vollständig geklärt ist, sowie andererseits die verschiedenen hydrologischen Daten nur in unzureichendem Maße vorliegen. Das unterirdische Entwässerungssystem erweist sich als ein riesiger Speicherraum, der auf den Abfluß der Aachquelle eine ausgleichende Funktion ausübt.

Über die Abflußverhältnisse an den Donauegeln bei Kirchen-Hausen und Möhringen sowie bei der Aachquelle während des Markierungsversuches im August 1969 und der anschließenden Beobachtungszeit bis März 1970 unterrichtet Tafel V.

1. 2. 2. Die hydrogeologischen Verhältnisse

Die Untersuchungen über den Wiederaustritt des am Brühl zwischen Immendingen und Möhringen versickernden Donauwassers konzentrierten sich schon früh auf den Aachtopf. Bereits in den ersten Berichten über die Donauversickerung (F. W. BREUNINGER 1719) wird der Aachtopf, vor allem auf Grund seiner starken Schüttung, mit dem Donauwasser in Zusammenhang gebracht. Nachdem dies durch Markierungsversuche nachgewiesen werden konnte, wurde eventuellen weiteren möglichen Wiederaustrittsstellen nur wenig Beachtung geschenkt. Im Rahmen des hier beschriebenen vergleichenden Markierungsversuches sollte daher auch dieser Frage, ebenso wie der Abgrenzung des Einzugsgebietes der Aachquelle, nachgegangen werden. Eine Grundlage dafür bildete die einleitend bereits erwähnte Quellaufnahme des Lehrstuhls für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe.

Für die hydrogeologische Situation des Raumes Donau-Aach sind folgende Faktoren von entscheidender Bedeutung:

a) Der Raum Donau-Aach wird zum weitaus größten Teil von der verkarsteten, nach Süden geneigten Malmplatte aufgebaut. Die Entwässerung ist daher vorwiegend unterirdisch und folgt den nach Süden einfallenden Schichten.

b) Die Malmfolge wird durch drei Mergelkomplexe gegliedert. Die Oxfordmergel im Liegenden bilden die Basis der Verkarstung. Die Stauwirkung der Kimmeridge-Mergel scheint dagegen auf Grund ihrer starken Zerklüftung und des hohen CaCO_3 -Gehalts (70 bis 85%) nur von lokaler Bedeutung zu sein. Die Ausbildung schwebender Karstwasserkörper im Hangenden dieses Schichtkomplexes ist daher nur sehr begrenzt. Die Zementmergel in der Hangendserie schließlich sind im Norden bereits weitgehend erodiert. Sie treten nur am Albsüdrand deutlicher als StauhORIZONT hervor.

c) Die abtauchenden Juraschichten werden im Süden von relativ wasserundurchlässigen Sedimenten der Molasse überlagert. Sie bilden für den Karstkörper eine Art von Dichtungsschürze, die allerdings im Hegau durch die rückschreitende rheinische Tiefenerosion während des Pleistozäns bis weit unter das heutige Vorflutniveau zerschnitten wurde.

d) Die gegenüber der Donau wesentlich intensivere rheinische Eintiefung im Pleistozän hatte eine starke Ausdehnung des rheinischen Einzugsgebietes zur Folge. Insbesondere wurde die unterirdische Karstwasserscheide weit nach Norden verschoben. Sie verläuft heute teilweise im Donautal und ermöglicht damit die Versickerung von Donauwasser. Der Karstwasserspiegel liegt bei den Versickerungsstellen ständig unter dem Donauniveau. Dadurch entwässern bei Niederwasser auch Teile nördlich der Donau, für die bei starker Wasserführung die Donau als Vorfluter wirksam ist, nach Süden zum Rhein.

e) Die Wasserführung der subjurassischen Molasse ist fast ausschließlich an geringmächtige Geröll-Lagen gebunden. Dagegen sind die quartären Kiese und Schotter in den tief eingeschnittenen Schmelzwasserrinnen des Hegau stark grundwasserführend. Die quartären Ablagerungen liegen zum Teil direkt über den Jurakalken, woraus eine enge Beziehung zwischen den Grundwässern der Talfüllung und dem Karstwasser resultiert.

Auf Grund der aufgezeigten Verhältnisse können wir den Untersuchungsraum in mehr oder weniger selbständige hydrogeologische Einheiten gliedern. Im weiteren werden daher der Karstkörper nördlich der Donau bzw. südlich der Donau, die Molasseauflagerung sowie die Moränenlandschaft und die quartäre Talfüllung im Hegau unterschieden. Eine solche Gliederung erweist sich gerade für die systematische und genetische Zusammenfassung und Einordnung der verschiedenen Wasseraustrittsstellen von Vorteil.

Der **Karstkörper nördlich der Donau** ist in seinem geologischen Aufbau sehr einheitlich. Die nach Süden einfallende Malmplatte wird von wenigen Tälern durchschnitten. Die Entwässerung der Hochfläche erfolgt fast ausschließlich unterirdisch. Die Sohlschicht des Karstkörpers, die Oxfordmergel, stehen zwischen Möhringen und Mühlheim an der Basis des nördlichen Donautalhanges bzw. nur geringfügig dar-

unter an. Dort treten mehrere große Quellen aus, z. B. die Bleiche (43) bei der Papiermühle NNE von Tuttlingen, die Kesselbachquelle (42) nördlich von Nendingen und die Wulfbachquelle (41) nördlich von Mühlheim. (Die in Klammer angeführten Zahlen bezeichnen die Beobachtungsstellen und beziehen sich auf die Karte der Fig. 25 sowie auf die Tabelle 1 am Schluß des Kapitels.)

Diese Wasseraustritte sind im wesentlichen an die Sohlschicht der Verkarstung und weniger an das Vorflutniveau der Donau gebunden. Dies zeigt sich in der Tatsache, daß in dem von Norden einmündenden Ursen- und Lipbachtal die großen Quellen ebenfalls im Hangenden der Oxfordmergel auftreten, ihre Wässer aber zum Teil bei Erreichen des Donautales in den Schottern versitzen.

Aus Grundwasserbeobachtungen in den Schottern des Donautales bei Tuttlingen (K. C. BERZ 1928, siehe auch Abschnitt 1. 2. 3.) weiß man, daß ein Teil dieser aus dem Malm zufließenden Wässer keineswegs mit der Donau talabwärts fließt, sondern unter der Donau hindurch nach Süden in den Hegau entwässert. Damit dehnt sich das rheinische Einzugsgebiet über die Donau hinweg nach Norden aus.

Westlich von Möhringen, im Bereich der nach Süden abtauchenden Joramulde des Brühl, können wir für das Gebiet nördlich und südlich der Donau einen einheitlichen Karstkörper annehmen. Die Erosion der Donau erreichte dort noch nicht die Sohlschicht der Verkarstung, so daß die darüberliegenden Oxfordkalke noch einen direkten Zusammenhang aufweisen.

Erst östlich von Fridingen wird die Donau voll als Vorfluter wirksam. Die Biselliquelle bei Beuron (36), der Großschmiedebrunnen (70), die Wasseraustritte bei Langenbrunn sowie die Quellen bei Hausen und Neidingen treten aus dem wasserdurchlässigen Oxford- bzw. Kimmeridge-Kalken im Niveau der Donau aus. Zusammen mit den bereits vorhin genannten Karstquellen Nr. 41, 42 und 43 zeichnen sie sich durch ein sehr einheitliches hydrologisches Verhalten aus. Neben ihrer stark schwankenden Schüttung ist die fast gleichbleibende Temperatur von durchschnittlich 9,5° C hervorzuheben (s. Fig. 26). Mit einer maximalen Schüttung von über 4 cbm/s ist der Großschmiedebrunnen in diesem Abschnitt des Donautales die größte Quelle. Er wird gleichzeitig von der „Heuberg-Wasserversorgung links der Donau“ und der „Heuberg-Wasserversorgungsgruppe rechts der Donau“ genutzt. Auch die genannten Wasseraustritte bei Beuron und Langenbrunn sind für die Versorgung der Albhochfläche im Norden bzw. im Süden des Donautales gefaßt.

Der Träger des unterirdischen Donau-Aach-Systems ist der **Karstkörper südlich der Donau**. Die abdichtende Molasseschürze im Süden der verkarsteten Jurakalke ist durch die rheinische Erosion bis fast 200 m unter das Niveau des Donautales angeschnitten, so daß die Ent-



Fig. 14: Der Aachtopf bei geringer Wasserführung. Im Hintergrund die Quellnische mit dem direkt unter dem Steg gelegenen Hauptaustritt. Links davon ein Nebenaustritt aus einer erweiterten Bankungsfuge, die jedoch bei einer Schüttung von weniger als 4 cbm zur Schwinde wird (Foto: H. HÖTZL, 1969).

wässerung fast ausschließlich auf dieses tiefere Vorflutniveau ausgerichtet ist.

Der Hauptvorfluter für die Hegaualb ist heute die Radolfzeller Aach mit dem Aachtopf (8), der bei 475 m über NN aus dem verschwammten Kalken des Untertithons entspringt. Gegenüber dem Brühl (650 m über NN) unterhalb von Immendingen — es ist dies mit 11,7 km die kürzeste Entfernung von der Aachquelle zur Donau — ergibt sich ein Höhenunterschied von 175 m. Ähnliche Verhältnisse beobachten wir auch weiter im Osten bei Eigeltingen. Dort treten Karstquellen (11 und 12) im Niveau des Krebsbaches bei 510 m über NN auf. Auch hier besteht bei der geringen Entfernung zur Donau von 11,8 km ein Höhenunterschied von 140 m. Der Karstwasseraufbruch (24) bei Engen-Aldorf liegt 525 m über NN. Die Höhendifferenz zum Donautal beträgt 125 m bei einer Entfernung von nur 7,7 km.

Im Jungpleistozän lag das Vorflutniveau im Hegau bis zu 50 m unter der heutigen Talflur. Die vermutlich nachrißeiszeitlich entstandenen Rinnen waren zum Teil direkt in den Karstkörper eingetieft, wie dies

z. B. auch aus dem Bohrprofil der Bohrung östlich Welschingen (56) deutlich hervorgeht (s. Seite 48). Schon im Mindel-Riß Interglazial mußte das Vorflutniveau teilweise bereits dem heutigen entsprochen haben, da man nördlich von Engen rißeiszeitliche Moränen im Niveau des Talbaches vorfindet (A. SCHREINER 1966). Die Anlage des Aachtopfes zeigt sehr schön, daß sich der Karstwasserkörper tatsächlich auf diese tieferen Vorfluter eingestellt hatte. Tauchversuche haben ergeben, daß an der Basis des Aachtopfes in 17 m Tiefe eine Unterwasserhöhle anschließt, die bei einem nur geringfügigen Anstieg 300 m weit nach Norden verfolgt werden konnte (J. HASENMAYER 1968). Dieser auf ein altes Vorflutniveau eingestellte Höhlengang wird auch heute noch von den Wassermassen benützt, die erst an der Grenze von den Jurakalken zu der jungen Talfüllung nach oben steigen. Die Karstwasseraufbrüche aus den quartären Schottern und Kiesen bei Engen-Altendorf (24), bei der Bleiche (18) östlich von Welschingen, bei der Bitzenquelle (15) im NE von Ehingen oder auch in der Salzbahnquelle (39) östlich von Eigeltingen deuten eine ähnliche Entwicklung an.

Die eiszeitlichen Schmelzwasserrinnen am Nordrand der alpinen



Fig. 15: Die erweiterte Bankungsfuge im Aachtopf 5 m östlich vom Hauptaustritt. Während bei starker Wasserführung Wasser hervorquillt, wirkt sie bei einer Schüttung von weniger als 4 cbm als Schwinde, wie im Bild durch Anschwemmung von Laub deutlich zu sehen ist (Foto: H. HÖTZL, 1969).



Fig. 16: Der Hauptaustritt des Aachtropfes links bei starker Schüttung am 4. Oktober 1968, rechts bei geringer am 5. November 1969 (Foto: W. Käss).

Vergletscherung bewirkten im Hegau eine beträchtliche Zunahme der rückschreitenden rheinischen Erosion und damit eine zunehmende Einbeziehung des Karstwasserkörpers in das rheinische Flußgebiet. Für eine exakte Angabe, zu welchem Zeitpunkt davon auch das Donaual betroffen wurde und damit die Versickerung von Donauwasser einsetzte, liegen keine genauen Anhaltspunkte vor.

Die Eintiefung der rheinischen Zuflüsse im Hegau bewirkte eine Absenkung des Karstwasserkörpers. Der davon betroffene Bereich dehnt sich von der Linie Engen-Aach-Salzbahnquelle in einem weiten Bogen nach Norden bis zum Donaual aus. Wie bereits erwähnt, werden bei niedrigem Karstwasserstand auch Teile nördlich der Donau in diese Absenkungszone mit einbezogen. Die Ausbildung der Absenkungszone könnte man vielleicht mit einem nach Norden zur Donau hingeneigten Trichter vergleichen, an dessen Verengung, an seinem tiefsten Punkt, die Aachquelle liegt. Dort kommt es zum Hauptaustritt des Karstwassers.

Früher ging man zum Teil von der Annahme aus, daß das gesamte Wasser des riesigen unterirdischen Einzugsgebietes in der Aachquelle zu Tage tritt. Der vergleichende Markierungsversuch im August 1969 zeigte aber, daß wir mit einer Entwässerung des Karstwasserkörpers im gesamten Bereich der jungpleistozänen, die Molasseabdichtung zer-

schneidenden Rinnen, d. i. etwa das Gebiet zwischen Engen und der Salzbahnquelle östlich von Eigeltingen, zu rechnen haben. Die Entwässerung erfolgt hierbei, abgesehen vom Aachtopf, weniger durch in Quellen an der Grenze vom Jura zum Quartär zu Tage tretendes Wasser als vielmehr durch den Übertritt des Karstwassers in die jungen Rinnenfüllungen. So konnte für die südlich von Engen und Aach aus den quartären Kiesen austretenden bzw. erbohrten Wasser (10, 15, 16, 18, 24, 25 und 56), die zum Teil schon vorhin als Karstwasseraufbrüche bezeichnet wurden, ein eindeutiger Zusammenhang mit dem am Brühl versickernden Donauwasser nachgewiesen werden.

Das nach relativ kurzer Zeit erfolgte erste Auftreten der Markierungsstoffe in den angeführten Wasseraustritten, z. B. bei der Bitzenquelle (15) 48 Stunden nach der Einspeisung am Brühl bzw. beim Tiefbrunnen von Beuren (10) nach 8 Tagen, weist auf verhältnismäßig hohe Fließgeschwindigkeiten hin. Dies läßt vermuten, daß die Menge des in die Schotter und Kiese übertretenden Karstwassers nicht unbeträchtlich ist.

Die direkt im Bereich der anstehenden Juragesteine zwischen Donautal und dem Vorfluter im Süden zu beobachtenden Wasseraus-



Fig. 17: Der Aachquellteich mit einem als Waller hochstoßenden Nebenaustritt links im Bild (Foto: W. Käss, 3. Juli 1969).

tritte sind fast ausschließlich an die eingeschalteten Mergelkomplexe gebunden. Da die Stauwirkung dieser Schichten, wie schon erwähnt, nur von lokaler Bedeutung ist, beträgt die Schüttung der Quellen meist weniger als 5 l/s, vielfach sogar nur einige Zehntelliter. Auf Grund der Lagerungsverhältnisse treten die Kimmeridge-Mergel nur nördlich der Donau als Quellhorizont hervor. Im Süden der Donau geht unter anderem der Wasseraustritt im mittleren Kilteltal (71) auf diese Schichten zurück. Er liegt bereits außerhalb der vom Hegau ausgehenden Absenkungszone und entwässert über die Aitrach zur Donau. Zahlreicher sind die im Bereich der Zementmergelerde auftretenden Quellen. Beispiele dafür sind die Wasseraustritte bei Bargen (7), im Kriegertal (6) und im östlichen Brudertal (75).

Eine besondere Stellung nimmt der Karstkörper östlich von Buchheim ein. Er befindet sich bereits außerhalb des Einzugsbereiches der rechtsrheinischen Zuflüsse im Hegau. Die Abdichtung durch die Molasse ist noch weitgehend wirksam, so daß der Karstwasserspiegel im Süden an der Grenze zur tertiären Überlagerung bei etwa 640 m über NN obertags austreicht. Darauf beruhen die Wasseraustritte bei Boll (33) und Heudorf (40) sowie die Mettenbachquelle (34). Sie entwässern über die Ablach zur Donau. Auch im Tiefbrunnen Altheim (30) unweit der Molassegrenze liegt der Karstwasserspiegel bei ca. 640 m über NN.

Nach Norden dürfte der Karstwasserkörper eine leichte Aufwölbung besitzen, deren Scheitelzone etwa von Buchheim nach NE verläuft. Im Anschluß daran sinkt der Karstwasserspiegel bis zur Donau ab. Diese ist, wie schon für das nördlich anschließende Gebiet erwähnt, ab dem Stauraum der Bronner Mühle (610 m über NN) unterhalb von den Versickerungsstellen bei Fridingen wieder voll als Vorfluter wirksam. Flußabwärts treten direkt am rechten Donauufer zwei große Karstquellen aus; der Rote Brunnen (31) östlich von Beuron und der Reinbrunnen (37) bei Thiergarten. Sie haben beide eine durchschnittliche Schüttung von 200 l/s und entspringen aus verschwammten, massigen Malmkalken (s. Fig. 18).

Die **tertiären Schichten** (Molasseauflagerung) im Hangenden der Malmfolge bestehen im Bereich der Hegualb vorwiegend aus den als Juranagelfluh bezeichneten Sedimenten der Oberen Süßwassermolasse. Sie führen meist nur geringmächtige oberflächennahe Grundwasserkörper. Der Name Juranagelfluh täuscht ein vorwiegend grobklastisches Material vor. Tatsächlich sind es aber überwiegend tonigmergelige Schichten, die nur vereinzelt Geröllagen als Wasserträger enthalten. Insgesamt treten zwar zahlreiche Quellen auf, doch ihre Schüttung liegt meist unter 1 l/s; häufig beträgt sie nur wenige Zehntelliter. Als StauhORIZONT ist vor allem die Basis des Tertiärs, der Bohnerzlehm, anzuführen.

Von den vielen Quellen seien die im Dorsteltal östlich des Neuhöwen (z. B. 27) sowie diejenigen im Bereich von Stetten (z. B. 23) und



Fig. 18: Der Rote Brunnen östlich Beuron (Beobachtungsstelle Nr. 31). Während bei geringer Quellschüttung die Wasseraustritte unmittelbar im Niveau der Donau erfolgen, quillt das Wasser bei starker Schüttung auch 7 m über der Donau aus dem Hangschutt und aus der danebenliegenden Martinshöhle hervor (Foto: H. HÖTZL, 1969).

von Watterdingen einschließlich der Wasserbohrung (74) als Beispiel genannt. Ferner noch die Wasseraustritte im Jägertal westlich von Engen und die alte Wasserfassung (50) für Emmingen ob Eck bei der Zeilenkapelle. Dort, wo in den Tälern unter dem Tertiär noch der Malmkalk zum Vorschein kommt, versinken vielfach die aus der Jura-nagelfluh kommenden Gerinne.

Eine wesentlich größere Bedeutung als Grundwasserträger haben die **quartären Kiese und Schotter** der Tal- und Beckenfüllungen im Hegau. Das nachrißeiszeitliche Talsystem wurde während der letzten Eiszeit mit bis über 50 m mächtigen, sandig bis kiesigen Schmelzwassersedimenten und Moränenmaterial aufgefüllt. Auf die enge Beziehung der Talgrundwässer mit dem Karstwasserkörper im Norden wurde bereits hingewiesen.

Für die hydrogeologischen Verhältnisse sehr wesentlich ist die Gliederung der Schmelzwasserschotter durch Geschiebemergel in eine untere und obere Serie. Wenn auch diese Abfolge nicht immer so einfach ist, sondern häufig gerade durch Verzahnung und Wechsellagerung an den Grenzbereichen oder durch die Einschaltung von Stausee-

sedimenten einen komplizierten Schichtaufbau bedingt, so können wir doch im allgemeinen zwei voneinander getrennte Grundwasserstockwerke unterscheiden.

Die liegenden Kiese wurden durch die Schmelzwässer des vorrückenden Gletschers in den tiefeingeschnittenen Rinnen angehäuft. Ihre Verbreitung hat A. SCHREINER (1968) auf Grund zahlreicher Bohrungen sowie geoelektrischer und seismischer Messungen dargestellt. Eine von diesen Rinnen im Untergrund folgt im wesentlichen dem heutigen Aachtal; eine andere verläuft aus dem Raum südlich von Engen, eventuell aus dem Talbach und Wasserburgertal kommend, über Welschingen nach Binningen und von dort nach Süden in Richtung Schaffhausen. Dieses untere, gespannte Grundwasserstockwerk ist heute durch zahlreiche Bohrungen vor allem im Raume von Singen für die Wasserversorgung erschlossen. Bei Singen liegt der Druckspiegel noch ca. 13 m unter Gelände. Bei Friedingen laufen 5 l/s und bei Beuren (10) 8 l/s artesisch über. Da das Wasser der 24 m tiefen Bohrung Beuron eine Temperatur von 13,7° C aufweist, vermutet man einen Zusammenhang mit einem Karstwasseraufbruch aus 120 m Tiefe (A. SCHREINER 1966).

Die erst im Frühjahr 1969 abgeteufte Bohrung (56) bei der Bleiche östlich von Welschingen der Wasserversorgungsgruppe Westlicher Hegau, die von den bisher genannten am weitesten im Norden liegt, erbringt im freien Überlauf 30—60 l/s (s. Fig. 19). Als Beispiel für die Schichtabfolge innerhalb der Talfüllungen sei das von Herrn Doktor A. SCHREINER aufgenommene und freundlicherweise zur Verfügung gestellte Bohrprofil angeführt:

- 0,0— 0,4 m Lehm braun
- 0,4— 1,8 m Kies und Lehm
- 1,8—24,7 m Kies und Sand; Durchmesser der Gerölle 2—6 cm, im einzelnen bis 40 cm; ca. 90% alpine Gerölle und 10% Juragerölle.
- 24,7—30,5 m Schluff, graugelb sandig, mit Geröllen (Geschiebemergeln); oben ein Dolomitblock (Findling), im feinen Sand.
- 30,5—47,0 m Kies und Sand; meist locker, lagenweise Nagelfluhgerölle bis zu 20 cm Größe.
- 47,0—50,0 m Kalkstein, weißgelb, hart (Weißer Jura).

Die angeführten Mächtigkeiten können als Richtwerte für die Talfüllungen angesehen werden, doch zeigen insbesondere die Geschiebemergel von Ort zu Ort starke Schwankungen.

Nach Süden schaltet sich zwischen dem Quartär und dem Weißen Jura ein immer mächtigeres Tertiär ein. So ist unter dem 60 m mächtigen Quartär bei Beuren eine ebenso mächtige Folge der Molasse anzunehmen (A. SCHREINER 1966).

Das obere Grundwasserstockwerk wird von den Terrassenschottern gebildet. Der Grundwasserspiegel liegt zum Teil nur geringfügig unter

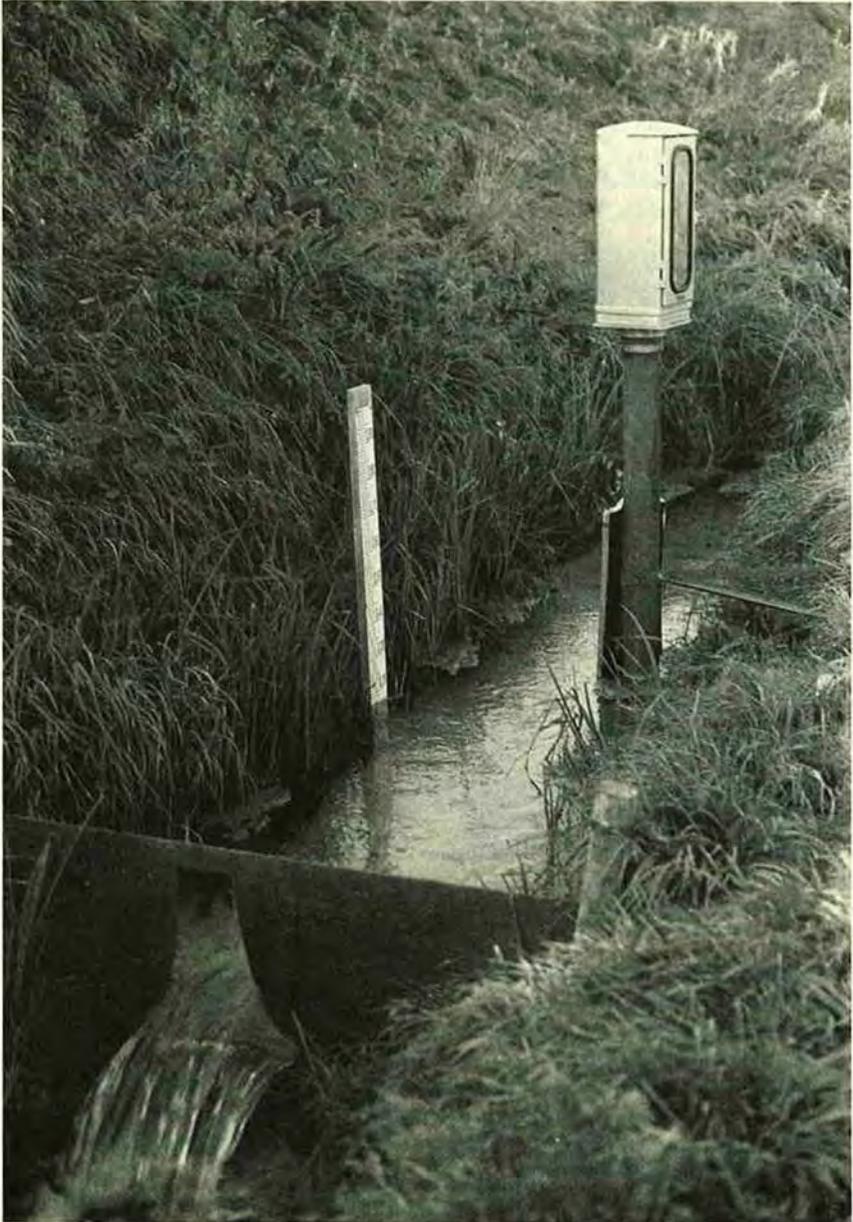


Fig. 19: Schreibpegelanlage mit hyperbolischem Wehr nach KESSLER am Abfluß der Bohrung für die Wasserversorgungsgruppe Westlicher Hegau (Beobachtungsstelle Nr. 56; Foto: H. HÖTZL, 1969).

dem Gelände und kommuniziert mit den offenen Gerinnen. Südlich von Engen, etwa zwischen Welschingen und Ehingen, treten an den Terrassenrändern mehrere Quellen (15, 16, 17, 18, 19 und 26) aus.

Für die Wasserversorgung der Stadt Singen ist die Bitzenquelle (15) nordöstlich von Ehingen gefaßt. Die größte von den genannten Quellen ist jedoch die Bleiche (18) östlich von Welschingen mit einer durchschnittlichen Schüttung von 35—40 l/s. Sie dringt als Waller aus den Kiesen hoch und ist heute zu einem Quellteich (s. Fig. 20) aufgestaut.



Fig. 20: Der Quellteich der Bleiche (Beobachtungsstelle Nr. 18) östlich von Welschingen. Im Vordergrund ein 60 cm breites Rechteckwehr mit Schreibpegelanlage (Foto: H. Hörzl, 1969).

Die Übereinstimmung ihres Chemismus sowie des Abflußverhaltens mit der Bohrung (56) lassen ein Aufstoßen des Wassers aus dem unteren Grundwasserstockwerk vermuten (vgl. Tafel V).

Die Versorgung der einzelnen Ortschaften und Gemeinden im nördlichen Hegau erfolgt vorwiegend aus bis zu 25 m tiefen Brunnenanlagen, die ihr Wasser aus dem oberen Grundwasserstockwerk beziehen. Genannt seien hier die beim Markierungsversuch 1969 mitbeobachteten Brunnen von Engen-Neuhausen (60), der Felsenbrauerei in Engen (25), der Stadt Aach (64), der Spinnerei Ten Brik bei Volkertshausen (69) und der Gemeinde Volkertshausen (76).

Im Raum südlich von Engen und Aach konnte durch den vergleichenden Markierungsversuch sowohl für das untere als auch obere

Grundwasserstockwerk, die zum Teil direkt miteinander in Beziehung stehen (s. Bleiche), der Nachweis der Verbindung mit dem Karstwasser im Norden erbracht werden. Für die Grundwässer der östlich davon gelegenen Talfüllung von Eigeltingen-Orsingen ist auf Grund der analogen hydrogeologischen Verhältnisse ebenfalls eine Erneuerung durch das Karstwasser in Betracht zu ziehen.

Im Bereich der meist hügeligen **Moränenlandschaft** im Hegau liegen fast nur Geschiebemergel bzw. geringmächtige kiesige Moränen über den älteren Schichten. Daher finden sich dort keine nennenswerten Grundwasservorkommen. Die auftretenden Quellen haben nur eine geringe Schüttung und bringen im wesentlichen oberflächennahes Wasser (z. B. Wasserversorgung Mahlspürgen, 48). Häufig sind es Entwässerungsgräben, die das Wasser der zahlreichen vernästen und versumpften, flachen Mulden und Talungen sammeln.

Zum Abschluß der hydrogeologischen Beschreibung sollen noch die Verhältnisse an den **Versickerungsstellen der Donau** erläutert werden. Die Hauptschwinden liegen im Bereich des Immendinger Wehres (s. Fig. 21), in der Flußschleife am Brühl zwischen Immendingen und



Fig. 21: Donaustauraum oberhalb des Immendinger Wehres. Zwischen den am rückwärtigen (rechten) Ufer gelegenen Gebüsch befinden sich die Schlucklöcher, über die das Donauwasser in die dahinter anstehenden gut gebankten und klüftigen Oxfordkalk abfließt (Foto: H. Hörzl, 1969).



Fig. 22: *Donauversickerung am Brühl zwischen Immendingen und Möhringen. Die Aufnahme zeigt den Beginn der trockenen Donaustrecke zwischen Flußkilometer 174,4 und 174,2 im Bereich der Eingabestelle G (Foto: V. MAURIN, 25. August 1969).*

Möhringen (s. Fig. 22, 23) sowie in der Flußschleife unterhalb von Fridingen (s. Fig. 24).

An allen drei Stellen tritt die Donau direkt oder fast unmittelbar an den rechten Talhang heran. Das Wasser versickert jeweils teils an der Sohle, teils fließt es seitwärts in die offenen Klüfte und Bankungsfugen der anstehenden Jurakalke, von wo es der allgemeinen Entwässerungsrichtung des Karstkörpers folgend nach Süden abfließt. Da die Versickerung im Bereich der gut wasserdurchlässigen Oxford- bzw. Kimmeridge-Kalke erfolgt, ist die Verbreitung dieser Schichten im Talniveau nicht unwesentlich.

Die Basis des Donautales liegt auf Grund seines zur Hauptstreichrichtung parallelen Verlaufes sehr horizontbeständig im Bereich der obersten Oxfordmergel und Oxfordkalke. Das jeweilige im Talgrund anstehende Gestein wechselt entsprechend der welligen Grenzfläche zwischen den beiden genannten Schichtkomplexen. Etwas stärker heraus fällt das Gebiet zwischen Immendingen und Möhringen. An einer flexurartigen Abbiegung, die das Donautal im Bereich des Immen-

dinger Wehres quert, werden die Oxford-Kalke ca. 60—70 m abgesenkt; etwa 3 km östlich erreichen sie durch einen allmählichen Anstieg wieder das alte Niveau.

Diese asymmetrische, Nord-Süd-streichende Mulde taucht mit dem allgemeinen Schichtfallen gegen Süden ab. Die starke Gesteinsauflöserung in den gekrümmten Bereichen, beim Abbiegen am Immendinger Wehr und im Muldentiefsten am Brühl, bewirkt für das in die Oxford-Kalke eintretende Donauwasser besonders günstige Abflußverhältnisse, so daß es dort zur Hauptversickerung kommt.

Da die Oxford-Kalke im Abschnitt von Möhringen bis Mühlheim am rechten Talhang mehrfach unter die Talflur reichen, wurden von K. C. BERZ (1928) überall dort, wo die Donau besonders nahe an den rechten Talhang heranreicht, weitere Versickerungsstellen vermutet; so zwischen Tuttlingen und Ludwigstal, zwischen Ludwigstal und Nendingen und bei Mühlheim. Tatsächlich errechnete W. TÜRK (1932) unter Berücksichtigung des Einzugsgebietes nördlich der Donau für die Strecke Möhringen bis Fridingen einen Minderabfluß von 1,5 cbm/s. Die von K. C. BERZ (1928) angeführten Beobachtungen der Grund-



Fig. 23: Die Donau unterhalb des Brühl zwischen Immendingen und Möhringen bei starker Wasserführung. Bei Vollversickerung liegt dieser Teil des Flußbettes trocken (Foto: W. Käss, 5. September 1968).



Fig. 24: Versickerungsstellen im Bereich der Fridinger Donauschleife. Im Flußbett und besonders am rechten Ufer steht Mittel-Kimmeridge-Kalk an, in dessen Bankungsfugen das Donauwasser abfließt (Foto: W. Käss, 28. April 1967).

wasserverhältnisse im Gebiet von Tuttlingen zeigen, daß ein wesentlicher Teil dieser fehlenden Wassermenge über das Talgrundwasser nach Süden abfließt. Die Erneuerung des Grundwassers in den Tal-schottern erfolgt aus dem Einzugsgebiet nördlich der Donau sowie in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel auch durch Zusickerung aus der Donau.

Östlich von Mühlheim schwenkt die Donau auf mehrere Kilometer in eine südliche, zum Einfallen der Malmplatte fast parallele Richtung um. Sie verläuft dadurch zunehmend im Bereich höherer Schichten. Bis unterhalb von Fridingen quert sie die Kimmeridge-Mergel und gelangt dann in den Schichtbereich der wasserdurchlässigen Kimmeridge-Kalke, wo es zum letzten Male zu stärkeren Wasserverlusten kommt. Die Lagerungsverhältnisse im Raum Fridingen wurden früher durch ein kompliziertes Störungssystem erklärt, das zum Teil auch für die dortigen Versickerungen verantwortlich gemacht wurde. G. HAFNER (1969) konnte aber zeigen, daß die angenommenen Störungen auf Faziesgrenzen mit damit verbundenen Mächtigkeitsveränderungen zurückzuführen sind.

deren Schüttung sowie die Temperatur und der Chemismus des Wassers bestimmt. Zur Untersuchung gelangten hierbei neben dem pH-Wert und der Leitfähigkeit die Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Fe^{++} und Mn^{++} sowie die Anionen Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{--} und PO_4^{---} ; des weiteren wurde auch das molekulare SiO_2 erfaßt. Die Ausführung der einzelnen Bestimmungen erfolgte im wesentlichen nach den in den „Deutschen Einheitsverfahren für Wasseruntersuchung“ beschriebenen Methoden.

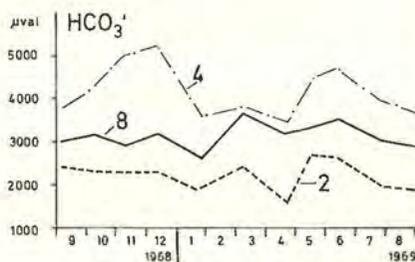
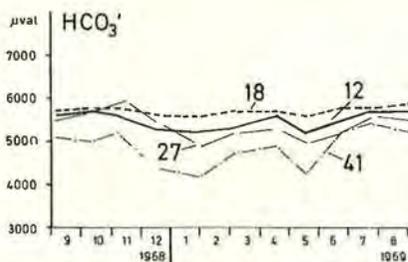
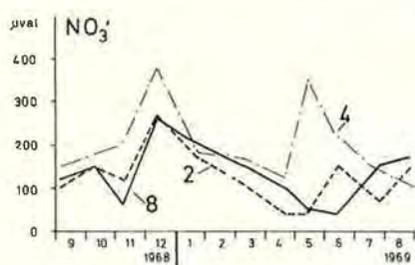
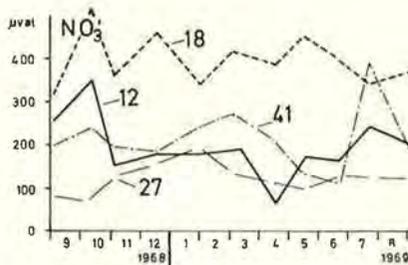
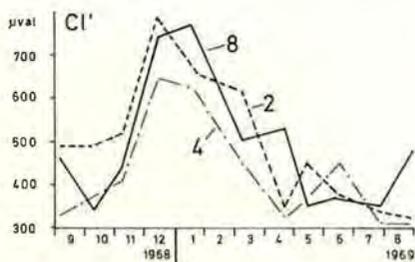
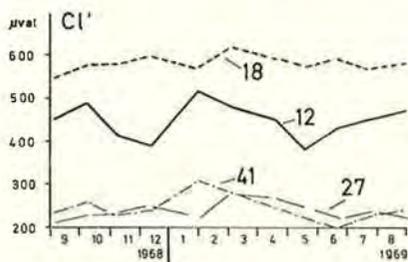
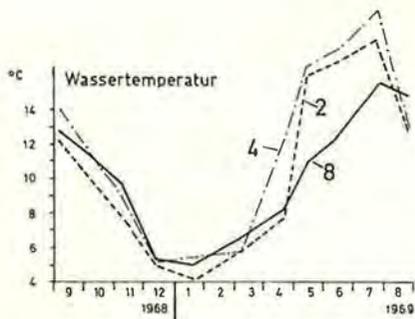
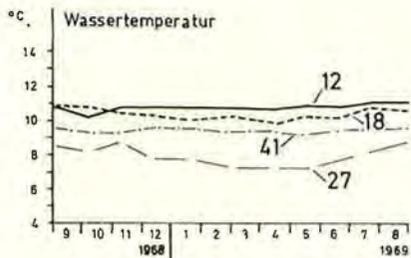
Die jahreszeitlichen Veränderungen im Chemismus konnten während der Zeit vom August 1968 bis August 1969 näher untersucht werden. An 50 ausgewählten Quellen und Brunnen (s. Tabelle 1) wurden monatlich einmal und an 26 weiteren wiederholt in unregelmäßigen Zeitabständen Proben gezogen, an denen man die genannten Bestimmungen ausführte. Parallel dazu verliefen die Untersuchungen über den Tritium- und Deuteriumgehalt sowie deren Veränderung im angeführten Zeitraum. An 31 von den 76 in der Tabelle 1 näher bezeichneten Wasseraustritten wurden des weiteren im August 1969 Proben für die Bestimmung des Radiokohlenstoffes entnommen.

Die Auswertung des umfangreichen Analysenmaterials aus dem gesamten Bereich der westlichen Alb erfolgte mit statistischen Methoden. Über die Ergebnisse wird, wie bereits erwähnt, noch an anderer Stelle berichtet. Die nachfolgende Beschreibung des Chemismus der Quellwässer aus dem Raum Donau—Aach beruht auf ihrer Zugehörigkeit zu den im vorherigen Abschnitt abgegrenzten hydrogeologischen Einheiten. Neben den am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe durchgeführten chemischen Untersuchungen stand eine große Zahl von Analysen, die im Labor des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg in Freiburg durchgeführt worden sind, zur Verfügung.

a) Die Quellen am Nordrand des Donautales

Für die an der Basis des Donautales entspringenden Quellen (36, 41, 42, 43 und 70) wurde bereits im Abschnitt 1. 2. 2. die über das ganze Jahr bemerkenswert konstante Temperatur erwähnt. Dagegen zeigt nun der Chemismus einen sehr ausgeprägten jahreszeitlichen Gang (s. Fig. 26). Bei einer mittleren Mineralisierung von $5484 \mu\text{val/l}$ traten Schwankungen bis 40% auf. Da es sich um ausgesprochene Ca-Hydrogenkarbonat-Wässer handelt — der Anteil des Hydrogenkarbonats lag auf der Anionenseite im Mittel bei $90 \text{ Millival-}\%$ (s. Fig. 27) —,

Fig. 26: Jahresgang der Meß- und Analysendaten der verschiedenen Wässer im Untersuchungsraum. Linke Hälfte: Wulfbachquelle (41) für die Quellen nördlich der Donau, obere Kressenlochquelle (12) für die Karstwässer südlich der Donau, Quelle im Dorstetal (27) für die Wässer aus der Juranagelstuh und Bleiche (18) bei Welschingen für das Grundwasser in den quartären Kiesen. Rechte Hälfte: Aachquelle (8) sowie Donauwasser von Immendingen (2) und Fridingen (4).



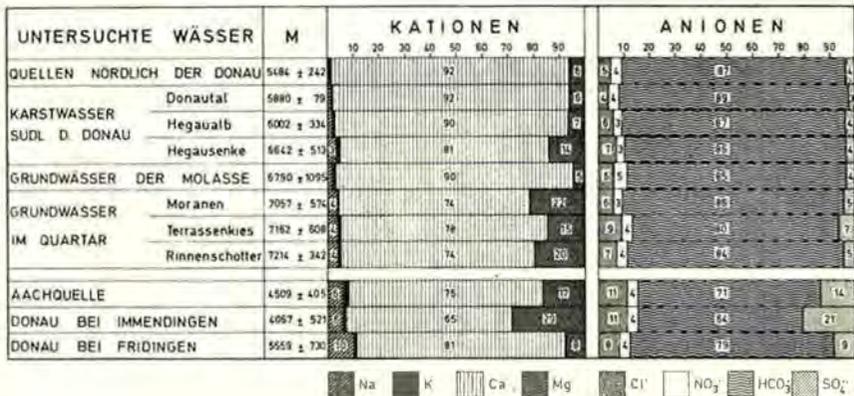


Fig. 27: Durchschnittliche Ionenverteilung der Quellwässer in Millival-% von Proben des Monats August 1969. M = Jahresmittel des Salzgehaltes in $\mu\text{val/l}$ und dazugehörige Standardabweichungen.

deckt sich die Jahreskurve des gesamten Mineralgehaltes mit dem der Karbonathärte, die wieder eine gute Übereinstimmung mit der von F. SCHEFFER & P. SCHACHTSCHABEL (1960) dargestellten Kurve des CO₂-Gehaltes in der Bodenluft aufweist.

Von Juni bzw. Juli bis Anfang November beobachtete man eine relativ hohe Mineralisierung von über 5000 $\mu\text{val/l}$. Danach trat ein plötzlicher Abfall auf einen Salzgehalt von ca. 4000 $\mu\text{val/l}$ ein. Nach einem leichten Anstieg im April sank dieser im Mai nochmals ab, um dann im Juni wieder kräftig anzusteigen.

Ein bei allen Quellen gleichartiger Jahresgang konnte auch für den Sulfatgehalt festgestellt werden. Dieser zeichnet sich durch die hohen Werte in den Monaten März bis Juni sowie durch niedere in den Monaten August bis Oktober aus. Die unregelmäßig verteilten, aber zum Teil beträchtlichen Schwankungen beim Nitrat mögen ein Effekt der landwirtschaftlichen Nutzung der Albhochfläche sowie der in den Karstkörper einsickernden Abwässer sein.

b) Die Quellen aus dem Karstkörper südlich der Donau

Die Wässer aus dem Bereich dieses großen Karstkörpers sind durch eine Ca-Hydrogenkarbonat-Vormacht charakterisiert. Von Norden nach Süden läßt sich eine Zunahme der Mineralisierung und eine Erhöhung des Anteils der Mg-Ionen beobachten. Mit durchschnittlich 5880 $\mu\text{val/l}$ ist der Mineralgehalt bei den Quellen (31 und 37) im Donautal am geringsten. Auch der Anteil der Mg-Ionen mit ca. 6 Millival-% gegenüber 90 bis 95 Millival-% Ca ist äußerst niedrig.

Die Quellen (30, 33, 34 und 40) im SE der Malmkalke bei Meßkirch weisen bereits eine mittlere Mineralisierung von 6000 $\mu\text{val/l}$ auf. Der Anteil der Mg-Ionen liegt bei 12 Millival-%. Der Zusammensetzung dieser Wässer entspricht auch die der Quellen am Westrand bei Kirchen-Hausen (1, 66 und 71) und südlich von Barga (7).

Die größten Salzgehalte schließlich findet man mit durchschnittlich 6642 $\mu\text{val/l}$ im Süden bei Eigeltingen (11, 12, 13 und 39) und in der als Karstaufruch gedeuteten Wasserfassung Engen-Altendorf (24). Auf der Kationenseite überwiegt das Ca mit 70 bis 80%, gefolgt vom Mg mit 15 bis 20% (s. Fig. 27).

Während die genannten Quellen den vorhin schon beschriebenen Jahresgang deutlich widerspiegeln, fällt die Aachquelle (8) mit einer nur geringen Streuung ihres Salzgehaltes — im Mittel 4509 $\mu\text{val/l}$ — heraus. Dies gilt besonders für die Erdalkali-Ionen. Dagegen sind die jahreszeitlichen Unterschiede beim Chlorid, Sulfat und Nitrat eher etwas größer. Sie fallen aber nicht so ins Gewicht, da ihr Prozentanteil wesentlich niedriger ist. Dies geht auf die starke Beeinflussung durch die Donau, besonders auf das bei Immendingen versickernde Wasser zurück (s. Fig. 27).

c) Die Quellen im Bereich der Juranagelfluh

Auf Grund der lithologischen Zusammensetzung ändert sich auch bei den aus den tertiären Schichten austretenden Wässern (z. B. 5, 23, 27, 50, 52 und 55) an der Ca-Hydrogenkarbonat-Vormacht nichts. Der durchschnittliche Salzgehalt beträgt 6790 $\mu\text{val/l}$. Im Mittel enthalten sie über 90% Ca und nur 4% Mg. Der Jahresgang der Mineralisation ist sehr ausgeprägt; zum Teil fallen besonders extreme NO_3 -Gehalte auf. Sie dürften wieder eine Folge der landwirtschaftlichen Nutzung des Einzugsgebietes sein und unterstreichen damit den oberflächennahen Charakter dieser Grundwasserspeicher.

Eine Ausnahme bildet die Wasserbohrung Watterdingen (74), die aus etwa 70 m Tiefe das Wasser aus der Juranagelfluh bezieht. Sie enthält 28% Na-Ionen, was sich auf der Anionenseite auch durch eine Erhöhung der Chloride (6%) und Sulfate (15%) bemerkbar macht.

d) Das Grundwasser in den quartären Kiesen und Schottern des nördlichen Hegau

Der hydrogeologisch in ein oberes und unteres Stockwerk geteilte Grundwasserkörper führt chemisch sehr einheitliche Wässer (s. Fig. 27). Die Mineralisierung beträgt im Mittel 7200 $\mu\text{val/l}$. Auf der Anionenseite haben die Chloride und Sulfate einen Anteil von jeweils 9%. Allerdings betragen die entsprechenden Werte bei den Quellen südlich von Engen (15, 16, 17 und 18) nur etwa die Hälfte der oben angeführten.

Für die Trennung des oberen und unteren Grundwasserstockwerkes auf Grund des Chemismus ergeben sich nur wenige Anhaltspunkte. Zu nennen ist der etwas höhere Anteil an Mg-Ionen sowie die geringfügig schwächeren jahreszeitlichen Unterschiede im unteren Stockwerk. Letzteres ist besonders für den Tiefbrunnen Beuren (10) bezeichnend.

e) Die Quellen im Bereich der Moränenlandschaft

Diese Quellen weichen in ihrem Chemismus nur unwesentlich von dem Grundwasser in der Talfüllung ab. Entsprechend dem meist oberflächennahen Einzugsgebiet weisen sie deutliche Jahresschwankungen auf. Der Anteil des Mg im Verhältnis zum Ca ist hier von allen bisher genannten Wässern am größten.

Zusammenfassend kann über den Chemismus der im Donau-Aach-Raum auftretenden Karst- und Schotterwässer festgestellt werden: Durch den großen Anteil der Karbonatgesteine in allen das Untersuchungsgebiet aufbauenden Schichten sind die auftretenden Wässer fast ausschließlich durch eine Ca-Hydrogenkarbonat-Vormacht gekennzeichnet. Die jahreszeitlichen Schwankungen des Salzgehaltes sind zum Teil beträchtlich und entsprechen dem Jahresgang des CO₂-Gehaltes in der Bodenluft. Die den einzelnen hydrogeologischen Bereichen zugeordneten Wässer zeichnen sich durch eine weitgehende Übereinstimmung ihres chemischen und hydrologischen Verhaltens aus, aber auch die Unterschiede zwischen den Gruppen sind nur unbedeutend. Eine Ausnahme bildet die Aachquelle, deren chemische und physikalische Kennwerte durch das versickerte Donauwasser beeinflusst sind. Ein direkter Nachweis über den Austritt von Donauwasser an weiteren Quellen konnte durch die chemische Untersuchung nicht erbracht werden.

Tabelle 1: Verzeichnis der Beobachtungsstellen

Die Rechts- und Hochwerte beziehen sich auf die Lage im Gauß-Krüger-Gitternetz.

Zeichenerklärung für Kolonne 4:

A: Monatliche Entnahme von Wasserproben in der Zeit von August 1968 bis August 1969 für die chemische Untersuchung sowie für die Bestimmung von Tritium und Deuterium.

B: Nur gelegentliche Entnahme von Proben für chemische Untersuchungen sowie für die Tritiumbestimmung.

C: ¹⁴C-Untersuchung.

M: Beim Markierungsversuch 1969 mitbeobachtet.

Nr.	Rechtswert	Hochwert	Art der Beprobung	nähere Bezeichnung
1	34 77620	53 08960	A, C, M	Hintschingen, Quelle 1000 m südl. des Ortes
2	34 80420	53 10860	A, C	Immendingen, Donauwasser
3	34 81700	53 12470	B	Möhringen, Sickerwasser-Umleitungsstollen
4	34 95745	53 18800	A, C	Fridingen, Donauwasser
5	34 88080	53 08040	A	Emmingen ab Egg, Quelle beim Winklerhof südl. des Ortes
6	34 86830	53 07110	A	Kriegertal, Quelle der alten WV Biesendorf
7	34 83020	53 04270	A, C, M	Bargen, Quelle 1000 m südsüdwestl. des Ortes
8	34 89440	53 00960	A, C, M	Aach, Aachtopf
8a	34 89025	53 00620	M	Aach, Aachtopf, Entnahme aus dem Werkskanal
8b	34 89350	53 00870	B, M	Aach, Aachnebenquelle
9	34 86960	52 90170	A, C	Singen, Thermalwasserbohrung
10	34 91140	52 95580	A, C, M	Beuren a. d. A., Tiefbrunnen
11	34 92080	53 03410	B, M	Eigeltingen, Untere Kressenlochquelle
12	34 91940	53 03650	A, C, M	Eigeltingen, Obere Kressenlochquelle
13	34 91740	53 03580	A, M	Eigeltingen, Brunnenstube der WV
14	34 94540	53 00500	B	Eigeltingen, Krebsbach
15	34 85500	52 99315	B, C, M	Ehingen, Bitzenquelle (Brunnenstube der WV Singen)
15a	34 85580	52 99355	A	Ehingen, Quelle 80 m östl. der Brunnenstube „Bitzenquelle“
16	34 84560	52 99150	A, M	Ehingen, Quelle 1000 m nördl. des Ortes
17	34 82900	53 99950	A	Neuhausen, Quelle 50 m östl. der Bohrung der WV Neuhausen-Engen
18	34 83670	52 98500	A, C, M	Welschingen, Bleichequelle
19	34 82280	52 98370	A	Welschingen, Quellgruppe am Südrand des Dorfes
20	34 78920	53 05540	B	Hegaublick: Gerinne bei der Einspeisstelle B
21	34 76030	53 09070	A, M	Kirchen-Hausen, Quelle 1000 m nördl. des Bahnhofes
22	34 80440	53 03465	A, M	Zimmerholz, Brunnenstube 200 m westl. des Ortes
23	34 78750	53 03770	A, M	Stetten, Quelle 100 m südl. des Ortes
24	34 82900	53 02330	A, C, M	Engen-Aldorf, alte Fassung
25	34 82970	53 01420	A, C, M	Engen, Tiefbrunnen der Felsenbrauerei
26	34 82750	52 97920	A, M	Welschingen, Quelle 500 m südl. des Ortskernes Drachenlochquelle

Nr.	Rechtswert	Hochwert	Art der Beprobung	nähere Bezeichnung
27	34 76660	53 05110	A, M	Aulfingen, Quellgruppe Dorsteltal
28	35 00160	53 05180	B	Hoppetenzell, Stockacher-Aach
29	34 99570	53 00410	A, C, M	Stockach, Quelle 1000 m südwestl. des Ortes
30	35 02010	53 16570	A, C, M	Altheim, Tiefbrunnen
31	34 99760	53 23890	A, C, M	Leibertingen, Roter Brunnen
32	34 99190	53 13300	A	Oberschwandorf, alte WV
33	35 02710	53 12930	A, C, M	Boll, Fassung 150 m unterhalb der Untermühle
34	35 04960	53 15990	A, C, M	Heudorf b. M., Karstquelle Metten- bachtal 1500 m südwestl. des Ortes
35	34 97480	53 20580	B, M	Beuron, Donauwasser im Stauraum Bronner-Mühle
36	34 97690	53 24120	A, C, M	Beuron, Pumpwerk 500 m nördl. des Ortes
37	35 06300	53 26710	A, C, M	Thiergarten, Reinbrunnen 700 m unterh. Neumühle, Donautal
38	34 87900	52 98655	A	Volkertshausen, Quelle 2400 m nordwestl. des Ortes
39	34 93800	53 03130	B, C, M	Eigeltingen, Salzbahnquelle
40	35 05210	53 17640	A, C, M	Heudorf b. M., alte Fassung 350 m nordwestl. der Kirche
41	34 91900	53 22615	A	Mühlheim a. d. D., Wulfbachquelle
42	34 89600	53 19700	A, C	Nendingen, Kesselbachquelle
43	34 86920	53 19350	A	Tuttlingen, Bleiche bei Papiermühle
44	34 83760	53 14410	A	Möhringen, Grundwasser
45	34 82040	53 11790	A	Möhringen, Brunnen Bahnwärter- haus
46	34 81720	53 06960	A	Mauenheim, WV
47	34 94200	52 99580	A	Orsingen, alte Fassung
48	34 96480	53 05160	A, C	Mahlspüren, WV alte Fassung, Quelle nördl. Münchhof
49	34 98620	53 09600	A	Gallmannsweil, Gerhardsbrunnen
50	34 89600	53 08215	A	Emmingen a. E., alte Fassung bei der Zeilenkapelle
51	34 86400	53 05460	A	Talmühle bei Engen: Quellfassung
52	34 92670	53 08790	A	Liptingen, Quelle bei der Bühlmühle
53	34 92600	53 07655	A	Rorgendorf, Holzwiesenquelle
54	34 91375	53 06880	A	Hohnstetten, alte Fassung
55	34 81500	53 08080	A	Mauenheim, Quelle 1500 m nördl. des Ortes
56	34 83700	52 98630	A, C, M	Welschingen, Bohrung der WV westl. Hegau bei der Bleichequelle (Beob.-Stelle 18)
57	34 94080	53 03745	B	Homberg, Kesselwiesenquelle
58	34 85170	53 10160	B	Hattingen, alte Fassung
59	34 95610	53 08220	B	Heudorf i. H., WV
60	34 82850	52 99950	B, C, M	Neuhausen, Tiefbrunnen der WV Neuhausen-Engen

Nr.	Rechtswert	Hochwert	Art der Beprobung	nähere Bezeichnung
61	34 88040	53 09950	B	Emmingen a. E., Quelle 200 m westl. des Ortes
62	34 87650	53 20010	B	Nendingen, Quelfassung Nendingen-Stetten
63	34 94780	53 00140	B, C	Orsingen, Tiefbrunnen der WV
64	34 87975	52 98870	A, C, M	Aach, Wasserbohrung südl. des Ortes
65	34 74040	52 97050	B, M	Tengen, Karstquelle der alten WV
66	34 76560	53 08040	B, M	Kirchen-Hausen, südl. Brunnenstube Kilteltal
67	34 80280	53 03735	B, C, M	Zimmerholz, Ulrichsquelle
68	34 84830	52 98560	B	Ehingen, Wasserbohrung westl. des Ortes
69	34 89740	52 98910	B, C, M	Volkertshausen, Brunnen der Spinnerei Ten Brik
70	34 99480	53 25900	B, C	Langenbrunn, Grosseschmiedebrunnen
71	34 78080	53 06860	B, M	Kirchen-Hausen, Kilteltal, Quelle im Gewann Bärtel
72	34 79440	52 96380	B, C, M	Binningen, Pumpwerk
73	34 76140	52 99190	B, M	Watterdingen, Karstquelle 2 km südwestl. des Ortes
74	34 75400	53 00620	B, C, M	Watterdingen, Bohrung der alten WV
75	34 87420	53 02040	B, M	Ehingen, WV im Wasserburgertal
76	34 90750	52 98280	B, C	Volkertshausen, Tiefbrunnen 500 m südöstl. des Ortes

2. Der natürliche Carbon-14- und Tritium-Gehalt der Wässer (M. A. GEYH und J. MAIRHOFER)

Bei karsthydrologischen Untersuchungen finden heute in zunehmendem Maße neben den klassischen Methoden der Hydrochemie und der Markierung der Wässer isotonenphysikalische Verfahren Anwendung. Der größere Informationsgehalt der Ergebnisse radiometrischer Messungen des natürlichen ^{14}C - und ^3H -Gehaltes gegenüber denen von hydrochemischen Analysen ist der Hauptgrund. Während mit letzteren nur genetisch bedingte Eigenschaften der Grundwässer studiert werden können, lassen sich mit den Angaben über ihren natürlichen ^{14}C - und ^3H -Gehalt oft zeitliche Zusammenhänge erkennen. In ungestörten Lockergesteinsaquifern werden Fließgeschwindigkeiten und -richtungen bestimmbar (B. B. HANSHAW et al. 1965, F. I. PEARSON, JR. & D. E. WHITE

1967, I. C. VOGEL 1970, G. ANDRES & M. A. GEYH 1970); sind die hydraulischen Verhältnisse eines Aquifers z. B. durch starke Wasserentnahmen gestört, kann mit den Ergebnissen der radiometrischen Analysen oft der Abbauvorgang rekonstruiert werden (M. A. TAMERS et al. 1968, M. A. GEYH & K. F. KUCKELKORN 1969, M. A. GEYH & G. SIEBERT 1970).

Solche detaillierten Angaben lassen ^{14}C - und ^3H -Untersuchungen an Karstwässern kaum zu. Als Folge ihres meist geringen Alters wird die Zeitinformation der natürlichen Isotopengehalte nur selten von der Zerfallsgeschwindigkeit des Radiokohlenstoffs oder Tritiums bestimmt. Dafür aber sind die seit Beginn der Kernwaffenversuche vorhandenen Änderungen der ^{14}C - und ^3H -Konzentration des atmosphärischen Kohlendioxyds bzw. Regens entscheidend (K. O. MÜNNICH et al. 1967, R. NYDAL 1968). Sie ermöglichen es, unter bestimmten Voraussetzungen die mittlere Verweilzeit rezenten Karstwassers abzuschätzen (E. ERIKSSON 1962, I. R. GAT, 1965) oder auch jahreszeitlich variierende Vermischungen von Wässern verschiedenen Ursprungs qualitativ und quantitativ zu erfassen. Hydraulische Verbindungen zwischen Versickerungsstellen und Quellen bzw. Brunnen lassen sich dagegen mit ^{14}C - und ^3H -Daten ihrer Wässer nicht sicher belegen. Besser geeignet hierfür sind Markierungs- und Triftversuche, die dafür nur in Ausnahmefällen die quantitative Bestimmung von Zumischungsraten gestatten.

Die zur Transformation der Ergebnisse radiometrischer Analysen in hydrologisch verständliche und verwertbare Angaben erforderlichen Grundkenntnisse sind allgemein noch so wenig verbreitet, daß näher darauf eingegangen werden muß.

Die seit Mitte der fünfziger Jahre beobachteten Änderungen des ^{14}C - und ^3H -Gehaltes des atmosphärischen CO_2 bzw. des Regens werden durch die bei Kernwaffenexperimenten erzeugten großen Mengen an Radiokohlenstoff und Tritium hervorgerufen. Der zeitliche Verlauf der durchschnittlichen ^{14}C -Konzentration (in ‰modern) des Luftkohlendioxyds in Mitteleuropa (R. NYDAL 1968) ist in Fig. 28, die Zeitabhängigkeit des mittleren ^3H -Gehaltes des Regenwassers (in T.U.) für unsere Breiten in Fig. 29 dargestellt (K. O. MÜNNICH et al. 1967)²⁾. Eine direkte Übertragung dieser Kurven in den Grundwasserbereich zu Datierungszwecken ist nicht zulässig, weil genetische Gesichtspunkte eine entscheidende Rolle spielen und deshalb mit berücksichtigt werden müssen.

Nach der die natürlichen Prozesse in guter Näherung wiedergeben-

²⁾ Die natürliche ^{14}C -Konzentration von organischen Substanzen wird in ‰modern angegeben. Definitionsgemäß hatte im Jahr 1950 gebildeter, terrestrisch-organischer Kohlenstoff unter Berücksichtigung der durch den sog. SUSS-Effekt bedingten Abnahme (J. C. HOUTERMANS et al. 1967) einen ^{14}C -Gehalt von 100 ‰modern.

Die natürliche ^3H -Konzentration von Grund- und Regenwasser wird in Tritium-Einheiten (T.U.) angegeben. 1 T.U. entspricht einer Konzentration von einem Tritium-Atom auf 10^{18} Wasserstoff-Atome.

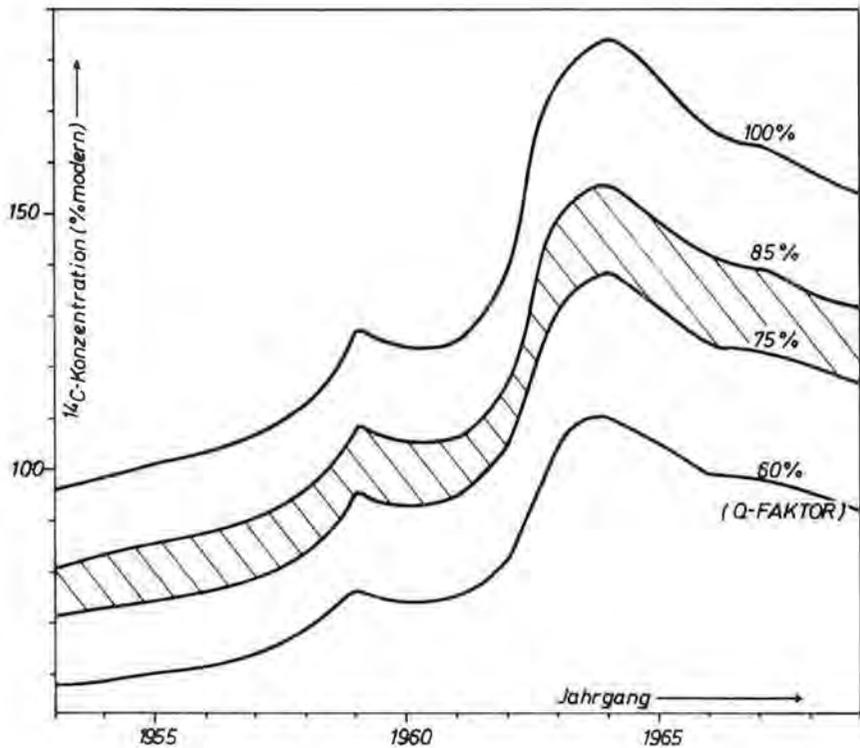


Fig. 28: Verlauf der ^{14}C -Konzentration von atmosphärischem CO_2 von 1953 bis 1969 für Mitteleuropa. Parameter: Q-Faktor (R. NYDAL 1968).

den Modellvorstellung zur Altersbestimmung von Grundwasser (K. O. MÜNNICH 1957, 1968) ist der in seiner freien und gebundenen Kohlensäure enthaltene Kohlenstoff nur zu einem Teil rezent und biogen und stammt ansonsten vom fossilen Bodenkalk. In erster Näherung sollte der Anteil Q an biogenem Kohlenstoff (in % als Verdünnungsfaktor bezeichnet) aus den Molkonzentrationen an freier (y) und gebundener Kohlensäure (x) nach Gleichung 1

$$Q = \frac{0,5 x + y}{x + y} \quad (1)$$

errechnet werden können (M. A. GEYH & WENDT 1965, F. I. PEARSON, JR. 1965). In der Praxis bestehen Schwierigkeiten, da nicht erfassbare Abweichungen des Wasserchemismus von der MÜNNICH-schen Modellvorstellung die exakte Berechnung von Q unmöglich machen (I. WENDT

et al. 1967, M. A. GEYH 1970 a). Das trifft ebenso auf die Versuche zu, den Verdünnungsfaktor von den massenspektrometrisch ermittelten $\delta^{13}\text{C}$ -Werten abzuleiten (F. I. PEARSON, JR. & B. B. HANSHAW 1970). Ein annehmbarer Ausweg ist die Verwendung der gemessenen ^{14}C -Gehalte rezenter Grundwässer (K. O. MÜNNICH & J. C. VOGEL 1959, M. A. GEYH

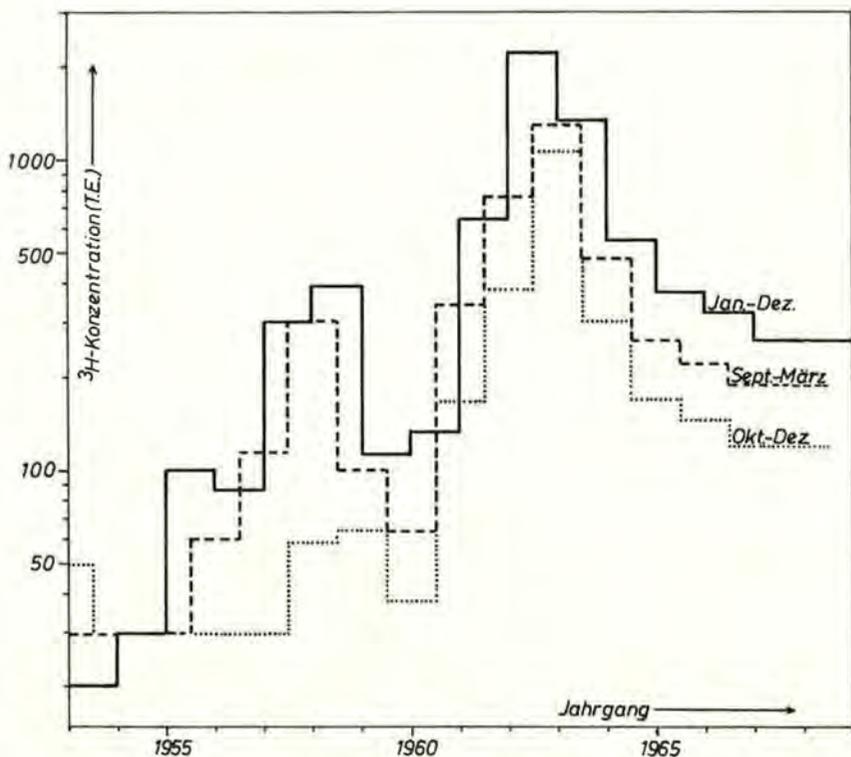


Fig. 29: Änderung des durchschnittlichen Tritium-Pegels vom Regen in Mitteleuropa für die Zeit von 1953 bis 1969. Parameter: verschiedene Beobachtungsperioden (K. MÜNNICH et al. 1966).

1970 b, J. C. VOGEL 1970), nach denen der Verdünnungsfaktor bei 85 ± 5 ‰ modern liegt. Doch scheinen in Gebieten des unbedeckten Karstes auch kleinere Werte bis 65 ‰ modern zuzutreffen (M. A. GEYH 1970 a).

Die Unkenntnis des wirklichen Wertes von Q bringt es mit sich, daß der Verlauf der ^{14}C -Konzentration für rezentes, unvermisches

Grundwasser nicht als Kurve, sondern nur als breites Band (in Fig. 28 schraffiert) dargestellt werden kann. Mit der Messung der ^{14}C -Konzentration eines unvermischten Grundwassers kann daher nicht der Zeitpunkt, sondern nur ein Zeitintervall für seine Entstehung festgestellt werden.

Die Übertragung der zeitlichen Abhängigkeit der Tritium-Konzentration von Regenwasser in die mittlere Verweilzeit eines Karstwassers bringt andere Probleme mit sich. Die ^3H -Konzentration der Niederschläge unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen, die bis zu 100% vom Jahresmittel ausmachen können. Im Spätsommer hat Regenwasser seine höchsten, im Frühjahr seine niedrigsten Tritium-Gehalte. Die ^3H -Konzentration von Karstwasser wird deshalb von der Jahreszeit abhängen, in der es erneuert wird. In Gebieten mit einer Bodenbedeckung wird dafür die kühlere Jahreszeit zwischen Spätherbst und Frühsummer angenommen. Im unbedeckten Karst ist wegen der besonderen Versickerungsverhältnisse mit einer ganzjährigen Karstwasserneubildung zu rechnen (D. B. SMITH et al. 1970). Diesen verschiedenen Möglichkeiten tragen die drei in Fig. 29 dargestellten Kurven für die Zeitabschnitte zwischen September—März, Oktober—Dezember und Jänner—Dezember Rechnung.

Da von nahezu keinem Karstwasser bekannt ist, in welchem Jahresabschnitt es erneuert wird, ist auch bei der Annahme, daß das versickernde Regenwasser ohne Vermischung bis zum Quellaustritt gelangt, aus dem Tritium-Gehalt nur ein Zeitintervall für die mittlere Verweilzeit ableitbar. Werden neben ^3H - auch ^{14}C -Analysen durchgeführt, läßt sich meist eine Einengung dieses Zeitintervalles erreichen.

Um möglichst viel über die Genese der Karstwässer im Gebiet der Donauversickerung zu erfahren, wurden aus 46 Brunnen und Quellen vom Juli 1968 bis Juni 1969 monatlich 1-Liter-Proben entnommen und ihre ^3H -Gehalte nach elektrolytischer Anreicherung direkt im Flüssigkeits-Szintillationsspektrometer bestimmt (Dr. J. MAIRHOFER, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Wien). Die Ergebnisse, die einen mittleren Fehler von $\pm 8\%$ haben, sind in der Tabelle 2 angegeben. Drei typische Kurven, die sich auf diese Untersuchungen beziehen, sind in Fig. 30 dargestellt. Sie sind auch für alle anderen untersuchten Wässer repräsentativ.

Der am häufigsten vertretene Wassertyp A genügt dem sogenannten Exponentialmodell (E. ERIKSSON 1962, J. R. GAT 1965, U. SIEGENTHALER et al. 1970³⁾). Wässer dieses Typs zeigen nahezu keine jahreszeitliche

³⁾ Dieser Name folgt aus der theoretischen Vorstellung, daß sich Karstwasser aus verschiedenen alten Komponenten zusammensetzt, deren Anteile mit wachsendem Alter exponentiell abnehmen.

Tabelle 2: Datum der Probenahme und Meßergebnisse in T.U.

Quell- Nr.	Quell-Bezeichnung	30. 7.	11. 9	9. 10.	10. 11.	15. 12.	26. 1.	12. 3.	25. 4.	15. 5.	16. 6.
1	Q 1000 m S Hintschingen	308	318	312	343	269	287	320	303	324	335
2	Donauwasser Immendingen	240	224	231	214	229	203	180	189	211	202
4	Donauwasser Fridingen	229		265	279	282	240	203	191	255	279
5	Q bei Winklerhof südöstl. Emmingen	405	393	373	343	361	379	354	362	350	343
6	Q Kriegertal alte WV Biesendorf	405	393	334	326	309	298	311	310	316	282
7	Q 1000 m SSW Bargaen	292	298	357	304	280	297	313	277	304	313
8	Aachtopf	229	243	272	222	255	244	293	246	242	238
10	Tiefbrunnen SW Beuren	4	0	19	19	32	6	16	7	14	9
12	Obere Kressenlochquelle	216	260	318	238	198	238	250	259	245	265
13	Brunnenstube WV Eigeltingen	388		313	234	254	251	285	288	273	292
15	Bitzenquelle 1000 m NW Ehingen	326	352	296	307	370	384	346	323	358	337
16	Q 1000 m N Ehingen	235	302	254	324	313	322	278	317	331	342
17	Bohrung WV Neuhausen	295	355	386	298	363	392	379	384	392	346
18	Bleichequelle	299	337	318	367	333	356	332	347	347	349
19	Quellgruppe in Welschingen	348	344	334	353	382	364	358	314	335	336
21	Q 1000 m N Bahnhof Kirchen	330	342	354	333	409	401	388	339	335	342
22	Brunnenstube NW Zimmerholz	428	335	345	319	484	461	432	444	495	464
23	Q 200 m S Stetten	472		404	363	515	486	448	460	476	482
24	Q-Gruppe NW Engen-Altdorf	284	334	344	337	424	422	432	416	454	385
25	Fassung Brauerei Engen	—	—	362	345	—	—	338	363	359	350
26	Q 150 m S Ortskern Welschingen	—	—	307	296	307	295	312	316	315	281
27	Q-Gruppe S Dorsteltal	311	381	375	373	394	400	331	351	376	335
29	Q-Gruppe S Stockach	269	283	276	273	281	277	288	289	266	291

Quell- Nr.	Quell-Bezeichnung	30. 7.	11. 9	9. 10.	10. 11.	15. 12.	26. 1.	12. 3.	25. 4.	15. 5.	16. 6.
30	Tiefbrunnen S Altheim	245	274	251	305	278	296	292	289	284	—
31	Roter Brunnen unterhalb Beuron	—	—	244	180	165	144	194	217	193	192
32	Alte WV Ober-Schwandorf	211	309	252	240	—	—	—	—	253	270
33	Fassung unterhalb Untermühle bei Boll	—	—	145	132	124	138	144	142	126	129
34	Karstquelle Mettenbachtal	—	—	319	269	217	263	351	362	321	371
36	Wasserversorgung Beuron	—	—	256	181	248	235	278	304	286	299
37	Reinbrunnen unterhalb Neumühle	—	—	274	233	214	231	—	—	285	278
38	Q NW Volkertshausen	273	316	268	266	297	304	289	300	292	313
40	Quellgruppe Heudorf	258	—	312	314	288	272	269	284	295	303
41	Wulfbachquelle	326	301	388	360	327	340	283	312	309	322
42	Kesselbachquelle	—	345	339	350	399	404	388	437	377	399
43	Bleiche bei Papiermühle	—	288	233	243	188	278	279	283	278	249
44	Grundwasser E Möhringen	—	207	302	—	—	—	—	—	—	—
45	Brunnen Bahnwärterhaus	—	208	263	248	269	244	252	206	227	230
46	WV Mauenheim	319	333	353	324	406	394	381	391	369	378
47	WV Orsingen	369	406	404	406	409	375	396	352	371	387
48	WV Mahlspüren	60	171	68	54	79	88	77	75	80	76
49	Gerhardsbrunnen	157	155	185	193	195	180	184	197	219	209
50	alte WV Emmingen	361	381	383	361	356	348	380	326	350	364
51	Brunnen Thalmühle	330	396	360	320	285	303	340	329	313	320
52	Q Bühlmühle	355	362	—	360	—	384	356	392	376	385
53	Q Holzwiesen, W Rorgendorf	—	350	401	363	381	459	378	371	361	374
54	alte WV Hornstetten	267	335	340	295	261	265	303	320	274	295
55	Q N Mauenheim	118	111	—	136	—	85	140	207	132	151
56	Wasserbohrung N von Nr. 18	—	—	—	—	—	—	—	446	409	462
64	Wasserbohrung S Aach	—	—	—	—	—	—	—	—	359	—

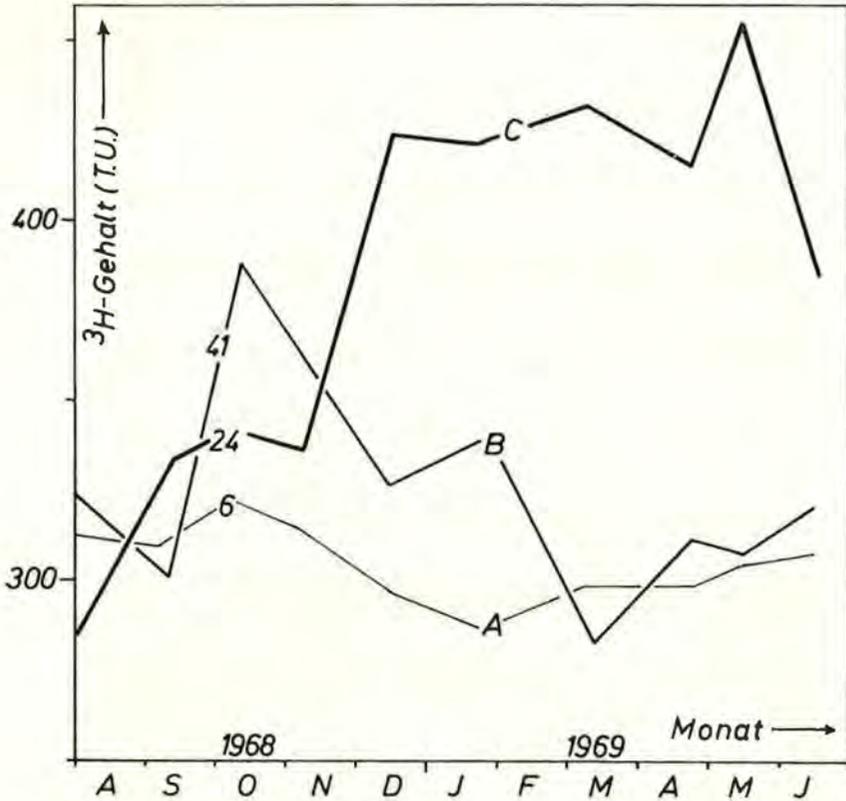


Fig. 30: Jahresgang des Tritium-Pegels verschiedener Karstwassertypen:
 A) Karstwasser mit gleichmäßiger Erneuerung;
 B) Karstwasser mit zeitweiser direkter Einspeisung von Regenwasser;
 C) Karstwasser mit zeitweiser verzögerter Einspeisung von Regenwasser.

Abhängigkeit ihrer Isotopengehalte. Zu ihnen gehören die Wässer der Entnahmestellen 1, 6, 7, 8, 15, 18, 19, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 38, 40, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 55 und 56. Der Ausgleich der großen Schwankungen der Isotopengehalte des versickernden Regenwassers kommt durch laufende Vermischung von verschiedenen alten Sicker-, Poren- und Kluftwässern infolge des Wechselspiels zwischen Verdunstung und Kondensation, Rückstau und Abfluß in den Oberflächenzonen zustande. Nimmt man eine zeitlich unveränderliche Wassermenge im Kluft- und Porenraum mit einem spez. Isotopengehalt B_n an, von der in regelmäßigen Abständen ein bestimmter Teil X (Umsatzrate) durch versickerndes

Regenwasser mit dem Isotopengehalt A_n ersetzt wird, stellt sich nach vollständiger Vermischung ein neuer Isotopengehalt des Wassers im Porenraum B_{n+1} ein. Er läßt sich für n Zeitabschnitte aus Gleichung 2

$$B_{n+1} = X (A_n + \sum_{i=1}^{n-1} i A_i (1 - X)^{n-i}) \quad (2)$$

berechnen. Wenn Tritium-Daten verwendet werden, muß wegen der Kürze der Halbwertszeit zusätzlich eine Zerfallskorrektur angebracht werden.

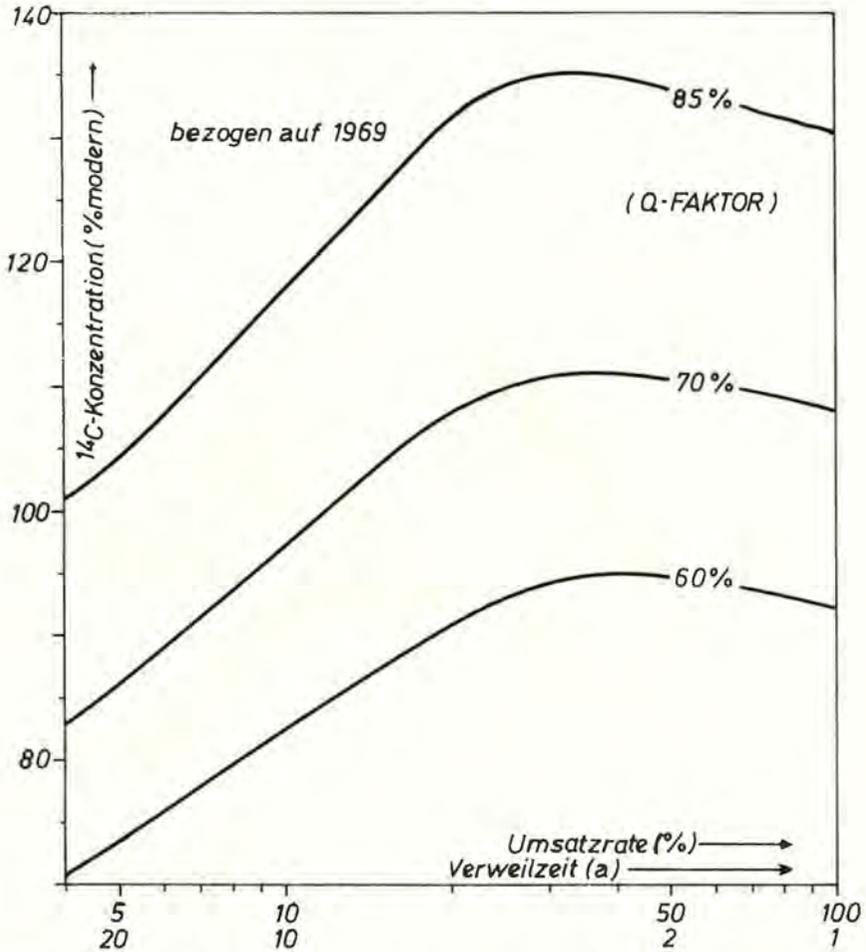


Fig. 31: Abhängigkeit der ^{14}C -Konzentration von der Umsatzrate und dem Q-Faktor, berechnet nach dem Exponentialmodell (E. ERIKSSON, 1962) für die Zeitspanne 1945 bis 1969.

Unter Zugrundelegung der aus Fig. 28 und 29 ablesbaren Meßwerte wurde $Bn+1$, bezogen auf 1969, in Abhängigkeit von der Umsatzrate X mit einer IBM 1620 errechnet. Die erhaltenen Kurven für ^{14}C und ^3H sind in Fig. 31 und 32 dargestellt. $1/X$ wird als mittlere Verweilzeit des Karstwassers bezeichnet.

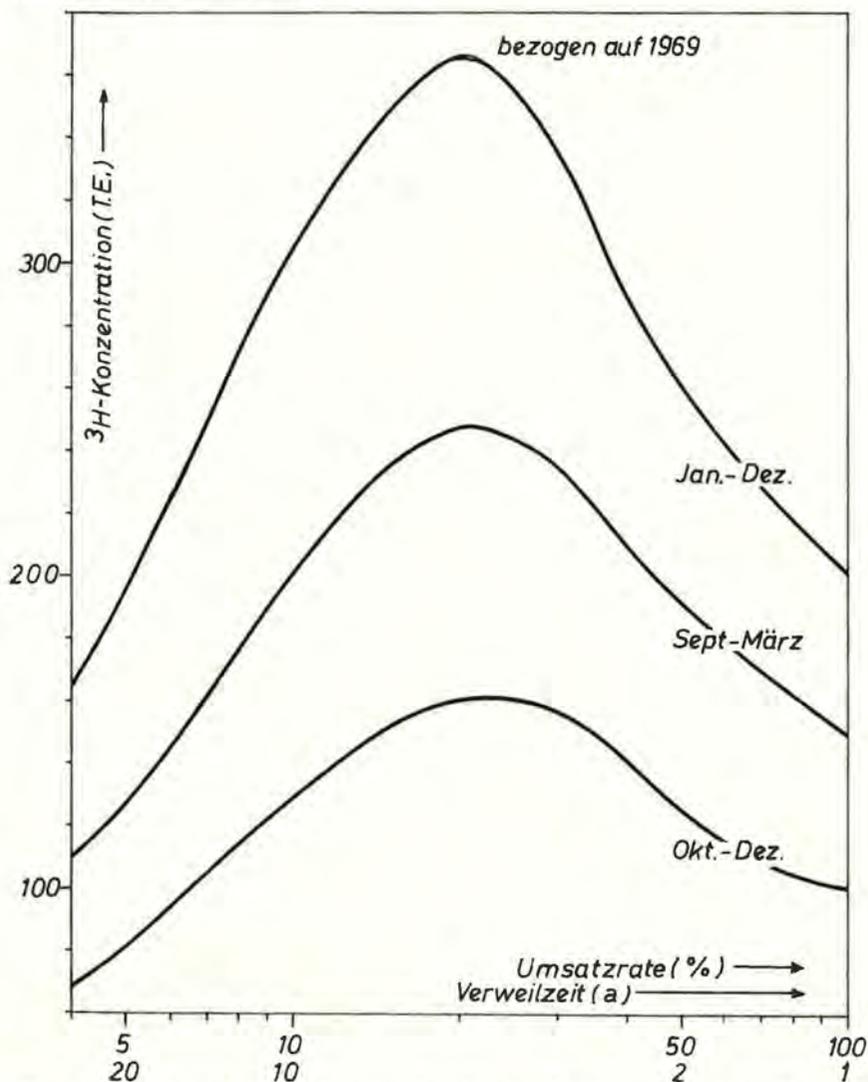


Fig. 32: Abhängigkeit des Tritium-Pegels von Karstwasser von der Umsatzrate und seiner Regenerationsperiode, berechnet nach dem Exponentialmodell (E. ERIKSSON, 1962) für die Zeitspanne 1945 bis 1969.

Die Wässer des Typs B ändern ihre ^3H -Gehalte zeitgleich mit dem Tritium-Pegel des Regenwassers. Doch sind die Amplituden meist kleiner, weil es sich um Mischungen des Wassertyps A mit Regenwasser handelt. Vertreten ist der Wassertyp B im Untersuchungsgebiet durch die Wässer der Entnahmestellen 2, 5, 13, 31, 34, 36, 37, 43, 48 und 54.

Die Wässer des Typs C zeigen gegenüber dem Tritium-Gehalt des Regenwassers einen zeitlich verzögerten Gang. Auch hier handelt es sich um Mischungen des Wassertyps A mit Regenwasser, doch erfolgt der Zutritt des letzteren mehr oder minder weit von der Beprobungsstelle entfernt. Repräsentanten des Wassertyps C sind die Wässer der Entnahmestellen 4, 12, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 41, 42, 45 und 46.

Ein anschauliches Beispiel für das Verhalten der beiden letztbesprochenen Wassertypen liefern die Tritium-Jahreskurven der nahe beieinander gelegenen Entnahmestellen 13, 48 und 12. Nach hydrogeologischen Beobachtungen wird die Entnahmestelle 13 u. a. von Oberflächenwasser aus dem Krebsbach gespeist. Aus Fig. 33 ist zu ersehen, daß dort im August 1968 ein stark tritiumhaltiges Wasser auftrat. Einen Monat später wird auch an der Entnahmestelle 48 eine Erhöhung des ^3H -Pegels festgestellt. Ihr Einzugsgebiet ist eine vermoorte Wiese, deren Grundwasserspiegel zwischen 0,5 bis 1,5 m u.G. liegt. Als Hauptkomponente wird Grundwasser des Typs A zur Quelle gelangen, doch kann nach besonders starken Niederschlägen auch unvermisches Regenwasser austreten. Das trifft gleichermaßen für die obere Kressenlochquelle (12) — eine reine Karstquelle — zu. Allerdings ist der Durchlauf von unvermischem Regenwasser noch mehr verzögert.

Aus diesen Beobachtungen scheint sich abzuzeichnen, daß die Karstquellen normalerweise einen Schwellenwert haben, der überschritten werden muß, bevor der Isotopengehalt des Quellwassers durch direkten Zulauf von Regenwasser beeinflusst wird. Die Größe dieses Schwellenwertes bestimmt, zu welchem Typ ein Wasser gehört.

Die besprochenen Ergebnisse von ^3H -Langzeituntersuchungen lassen einige Folgerungen für die Planung und die Durchführung von Isotopenstudien in Karstgebieten zu. Da der Wassertyp A der am häufigsten vertretene ist, werden bei übersichtsmäßigen, karsthydrogeologischen Arbeiten oft bereits ^3H -Messungen an Einzelproben hilfreich sein. Allerdings sollte mit einer Schwankungsbreite des Meßwertes von mindestens $\pm 15\%$ gerechnet werden. Nur wenige Wiederholungsanalysen an später entnommenen Proben ermöglichen in Verbindung mit hydrologischen Angaben ohnedies in den meisten Fällen einen Entscheid, welcher der Wassertypen — A, B oder C — wirklich vorliegt und ob Langzeituntersuchungen angebracht sind. Bei systematischen Studien geophysikalischer und hydrogeologischer Natur kommt man um die Aufnahme detaillierter ^3H -Langzeitkurven kaum umhin.

Für die praxisnahe Zusammenarbeit zwischen Hydrogeologen und Isotopenlabor empfiehlt sich die gemeinsame Ausarbeitung eines lük-

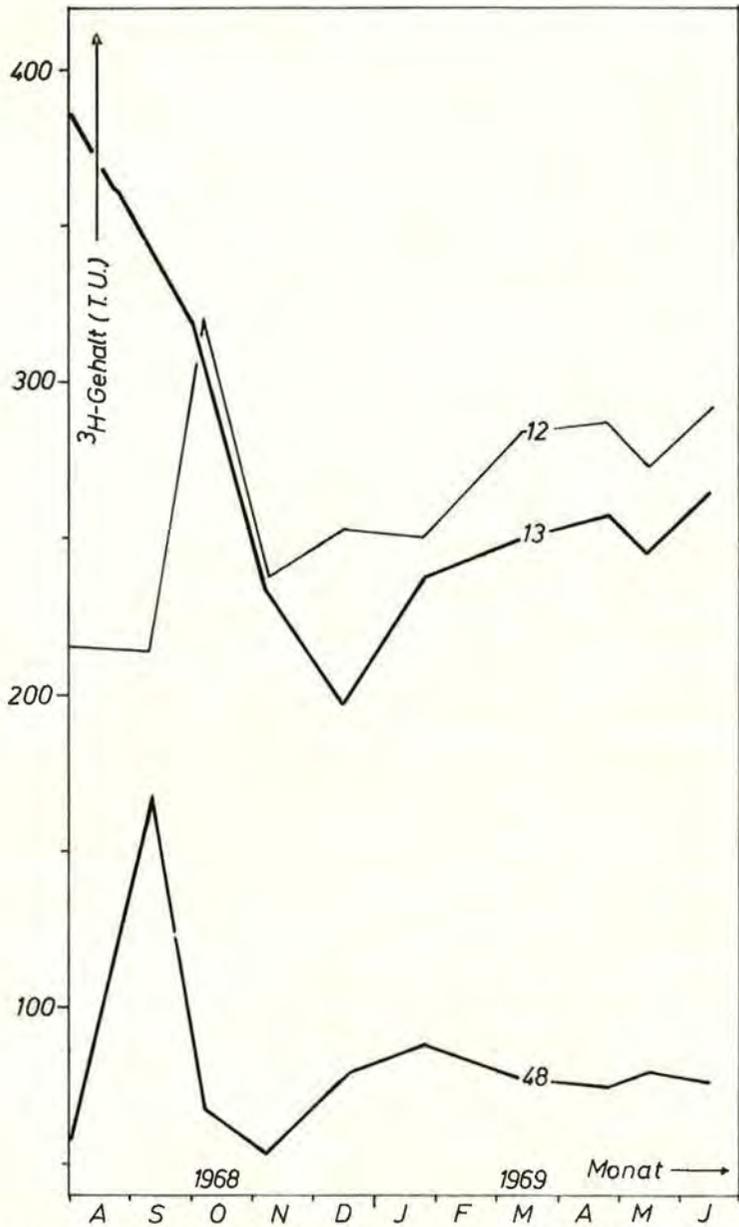


Fig. 33: Verzögerter Durchlauf einer Zusickerung stark tritiumhaltigen Regens in verschiedenen Beobachtungsstellen eines begrenzten Gebietes.

kenlosen und sinnvollen Beprobungsplanes für jede Aufgabe. Die Analysen werden jedoch erst in Angriff genommen, wenn schon eine so große Anzahl von Proben vorliegt, daß die Untersuchung einer bestimmten Auswahl von ihnen eine Vorauswertung zuläßt. Gestützt auf das sich ergebende Bild wird eine nächste Gruppe analysiert und ausgewertet. Durch ein solches etappenweises Vorgehen werden durchschnittlich 70% der ursprünglich abgesprochenen ^3H -Analysen überflüssig.

Wegen der wesentlich geringeren Langzeitänderungen und jahreszeitlichen Schwankungen der mittleren ^{14}C -Konzentration des Luftkohlendioxids sind ^{14}C -Einzeluntersuchungen an Karstwasser nahezu immer aussagefähig, auch wenn es sich um den Typ B und C handelt. Selbstverständlich wird die Interpretationsmöglichkeit erweitert, wenn

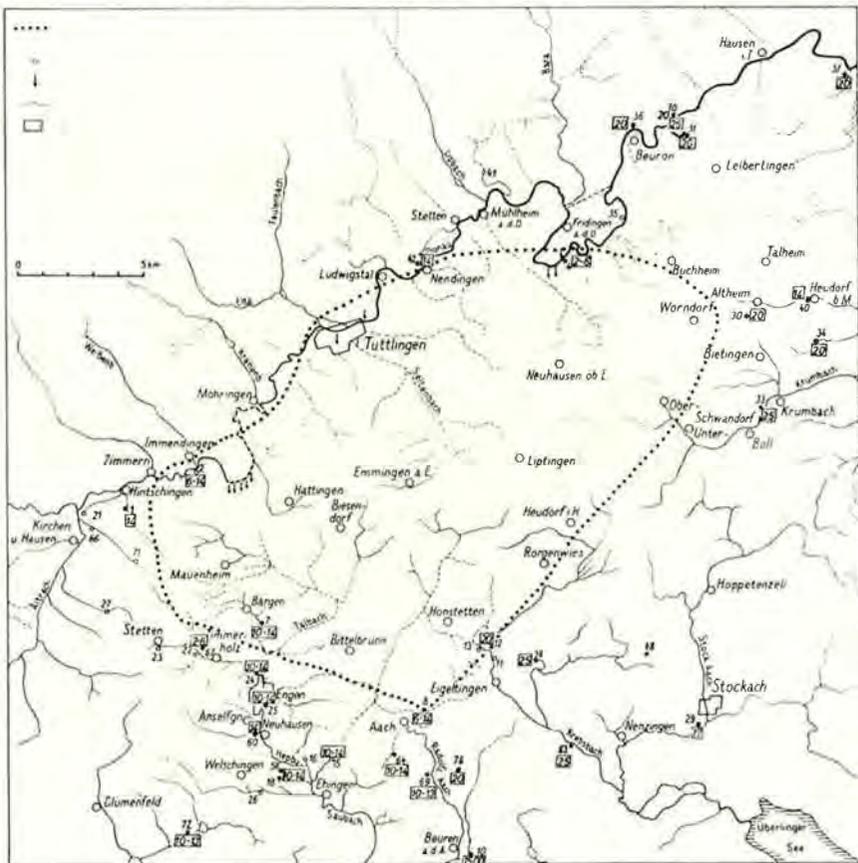


Fig. 34: Übersicht über Beobachtungsstellen für ^{14}C - und ^3H -Bestimmungen mit Angabe der mittleren Verweilzeit des Wassers in Jahren.

eine Auswahl über das ganze Jahr entnommener Proben gemessen werden kann. Unumgänglich wird dies, wenn die jahreszeitliche Abhängigkeit der Vermischung von Wässern verschiedenen Ursprungs erfaßt werden soll.

Vom Untersuchungsgebiet liegen vorerst nur ^{14}C -Einzeluntersuchungen an Proben vor, die im August 1969, dem Ende eines ausgesprochen trockenen Sommers, entnommen worden sind. Die 32 Entnahmestellen sind aus Fig. 34 zu ersehen. Die radiometrischen Messungen des ^{14}C - und ^3H -Gehaltes erfolgten mit Proportionalzählrohren im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, Hannover (M. A. GEYH, 1967 und 1969). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 enthalten. Die Bestimmung der mittleren Verweilzeiten der Karstwässer erfolgte unter der Annahme, daß das Exponentialmodell erfüllt ist und damit die Meßwerte mit den in Fig. 31 und 32 dargestellten Kurven in Einklang stehen müssen.

Wie aus Fig. 34 zu ersehen ist, lassen sich die untersuchten Wässer — von wenigen Ausnahmen abgesehen — in drei Altersklassen einteilen. Westlich einer zwischen dem Kesselbrunnen (42) und dem Aachtopf (8) gedachten Trennlinie werden fast ausschließlich mittlere Verweilzeiten von weniger als 14 Jahren gefunden, östlich davon sind Werte größer (20 Jahre vorherrschend). Ganz im Süden treten Wässer mit Modellaltern über 1000 Jahre auf.

Hydrologisch gesehen bestehen die unterirdischen Wässer aus dem Gebiet der Donauversickerung aus vier Komponenten:

- I. Donauwasser, das durch die Probe aus Immendingen (2) repräsentiert wird,
- II. Hochflächenkarstwasser mit einer mittleren Verweilzeit von mehr als einem Jahrzehnt,
- III. akkumuliertes Niederschlagswasser mit einer mittleren Verweilzeit von weniger als einem Jahr, und
- IV. Donaukarstwasser, einer Mischung aus Donauwasser, Hochflächenkarstwasser und ggfs. auch akkumuliertem Regenwasser.

Unter Berücksichtigung dieser Aufschlüsselung lassen sich die auf ihren natürlichen Isotopengehalt untersuchten Grundwässer in vier Kategorien zusammenfassen:

In die **Kategorie I** werden das Donauwasser der Versickerungsstelle bei Immendingen (2) und das Quellwasser des Aachtopfes (8) gestellt, da ein hydraulischer Zusammenhang zwischen diesen Entnahmestellen besteht. Ein zusätzliches Indiz hierfür ist die Übereinstimmung der ^{14}C - und ^3H -Gehalte, die bei dem Aachtopf sogar an zwei innerhalb einer Woche entnommenen Proben bestimmt wurden. Es beweist darüber hinaus, daß zum Untersuchungszeitpunkt auf dem Fließweg von Immendingen zum Aachtopf kein oder nur wenig Wasser verschiedener Isotopenzusammensetzung zutreten sein kann. Daß diese Feststellung zu anderen Zeiten nicht zutreffen muß, zeigt der in Fig. 35 dargestellte

Tabelle 3: Ergebnisse der radiometrischen ^{14}C - und ^3H -Analysen an Karstwässern aus dem Gebiet der Donauversickerung (August 1969)

Entnahmestellen		^{14}C -Gehalt % modern	^3H -Gehalt T. U.	Q	Mittlere Verweilz. a
2	Immendingen	100.7 ± 2.3	212.7 ± 5.4	53	6—14
8	Aachtopf (1. Entn.)	103.6 ± 1.1	216.5 ± 5.5	58	6—14
	Aachtopf (2. Entn.)	100.7 ± 0.9	217.9 ± 6.4	59	
4	Fridingen	108.9 ± 1.2	294.4 ± 8.0	58	2— 6
67	Ulrichquelle	107.3 ± 0.6	310.6 ± 8.4	58	2— 6
40	Heudorf	90.1 ± 0.7	253.1 ± 7.2	58	14
29	Stockach Süd	84.5 ± 0.9	239.6 ± 6.0	59	17
31	Roter Brunnen	84.0 ± 0.8	247.4 ± 7.0	56	20
30	Tiefbrunnen Alth.	84.2 ± 0.6	254.5 ± 6.1	57	20
76	Tiefbrunnen Volkertsh.	82.8 ± 0.6	215.2 ± 5.4	58	20
34	Mettenbach	78.8 ± 0.6	239.5 ± 5.9	58	20
12	Obere Kressenlochquelle	87.2 ± 0.8	185.8 ± 4.6	59	20
37	Reinbrunnen	84.3 ± 1.2	202.9 ± 5.0	57	20
33	Untermühle Boll	73.6 ± 1.1	151.3 ± 4.0	59	25
39	Salzbahnquelle	70.5 ± 0.9	113.2 ± 3.5	57	25
42	Kesselbachquelle	89.4 ± 1.0	286.7 ± 7.1	57	14
36	PW Beuron	82.4 ± 1.0	185.7 ± 4.6	54	20
70	Großer Schmieledbrunnen	76.0 ± 1.2	194.4 ± 4.2	56	25
1	Hintschingen	86.7 ± 1.0	318.6 ± 8.5	56	14
7	Südbargen	99.8 ± 0.8	266.7 ± 6.4	61	10—14
15	Bitzenquelle	97.0 ± 0.9	288.5 ± 6.7	61	10—14
18	Bleichenquelle	96.5 ± 0.6	340.1 ± 6.0	59	10—14
24	Engen/Altdorf	100.0 ± 0.9	293.2 ± 6.9	58	10—14
25	Brunnen Engen	95.6 ± 0.8	298.9 ± 7.0	57	10—14
56	Brunnen Bleichenquelle	95.5 ± 0.9	317.8 ± 7.3	63	10—14
60	Tiefbrunnen Neuhausen	89.7 ± 0.8	312.0 ± 7.4	58	14
64	WV Aach	98.1 ± 1.1	278.2 ± 6.5	64	10—14
69	Ten Brink	95.2 ± 1.3	255.5 ± 6.2	55	10—13
72	Binningen	94.6 ± 1.2	235.3 ± 5.6	56	10—13
63	WV Orsingen	87.9 ± 0.7	119.3 ± 3.5	56	25
10	Beuron an der Aach	54.3 ± 1.0	5.1 ± 1.1	55	1500
9	Thermalquelle Singen	10.7 ± 0.4	2.4	54	14.400

Jahresgang der ^3H -Konzentration der Wässer aus den Entnahmestellen 2, 8 und 4. Das aus dem Schwarzwaldbereich zuströmende Donauwasser (2) hat erwartungsgemäß im Frühjahr durch Beteiligung tritiumarmen Schmelzwassers seinen niedrigsten ^3H -Gehalt. Interessanterweise ist, daß bei dem Wasser des Aachtopfes dies nicht der Fall ist. Gerade in der Zeit der Karstwasserhöchststände ist in stärkerem Maße älteres, also tritiumreicheres Wasser beteiligt, während sich sonst vermutlich durch Vermischung von Hochflächenkarstwasser mit Donauwasser eine nahezu konstante Isotopenzusammensetzung einstellt.

Die Ermittlung einer mittleren Verweilzeit für die beiden zur Kategorie I gehörenden Wässer gemäß dem Exponentialmodell ist nach

diesem Befund sicher nicht gerechtfertigt. Theoretisch ergibt sich ein Intervall von 6 bis 14 Jahren.

Hydrologisch wichtig ist schließlich die sich aus dem hohen ^{14}C - und ^3H -Gehalt der Probe 2 ergebende Feststellung, daß im Sommer kaum sehr altes Wasser aus den Flußschottern ins Donauwasser gelangt. Möglicherweise muß dazu ein größeres Druckgefälle bestehen, wie es sich nur beim Karstwasserhöchststand, z. B. im Frühjahr, aufbauen wird. Im Sommer enthält das Donauwasser bevorzugt akkumuliertes Niederschlagswasser.

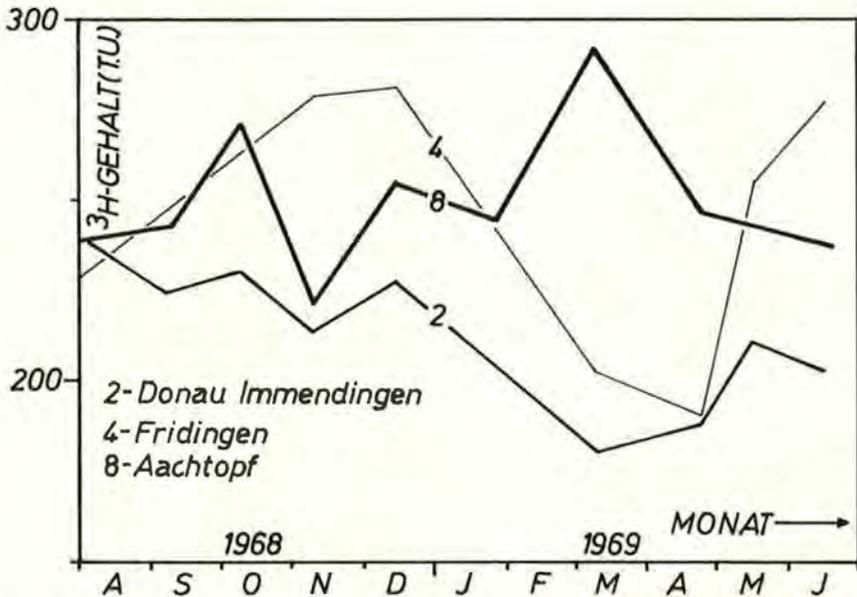


Fig. 35: Jahresgang des Tritium-Pegels des Wassers an den Donauversickerungen in Immendingen und Fridingen sowie aus dem Aachtopf.

Wegen der durch Markierungsversuche nachgewiesenen hydraulischen Verbindung zwischen der Donauversickerungsstelle bei Fridingen (4) und dem Aachtopf und der aus der Gleichheit der Isotopendaten folgenden genetischen Ähnlichkeit der Wässer aus den Entnahmestellen 4 und 67 ist ihre Einordnung in die Kategorie I angebracht. Der mit dem Jahresgang des Tritiumpegels vom Regenwasser nahezu zeitgleiche Verlauf des ^3H -Gehaltes im Wasser aus Fridingen (s. Fig. 35) läßt eine relativ kleine mittlere Verweilzeit und eine ganzjährige Regeneration erwarten. Tatsächlich sind die Tritiumgehalte dieser beiden Wässer nur unter dieser Bedingung mit den Kurven der Fig. 32 zu vereinbaren. Die mittlere Verweilzeit sollte zwischen 2 und 14 Jahren liegen. Wird

ein Verdünnungsfaktor von 70 ‰ modern angenommen, ergibt sich aus der ^{14}C -Kurve der Fig. 31 ein Intervall von 0 bis 6 Jahren. Durch Kombination beider Ergebnisse engt sich die Zeitspanne für die wirklich mittlere Verweilzeit auf 2 bis 6 Jahre ein.

Der **Kategorie II** gehören vor allem die Hochflächenkarstwässer östlich der zwischen dem Kesselbrunnen und dem Aachtopf gedachten Trennlinie an (12, 29, 30, 31, 33, 34, 37, 39, 40 und 76). Wie das sternförmige Abfließen der Markierungsstoffe der bisher in diesem Gebiet durchgeführten Färbeversuche zeigt (W. Käss, 1965), wird ein zusammenhängender Karstwasserkörper vorliegen, dessen gewölbter Spiegel zur Donau und nach Süden hin abfällt. Die mittlere Verweilzeit des relativ schnell abfließenden Hochflächenkarstwassers ist im allgemeinen größer als 20 Jahre. Aus den Langzeitbeobachtungen des Tritiumpegels (s. Tab. 2) ist zu erkennen, daß in die an den Randzonen der Albhochfläche liegenden Entnahmestellen (31, 34, 12) zeitweise akkumuliertes Regenwasser gelangt. Die in dem überdeckten Karstwasserbereich befindlichen Wässer mit den höchsten mittleren Verweilzeiten in diesem Gebiet (33, 39) werden davon nicht berührt. Die Abgeschlossenheit ihrer Wasserführung zeigt sich u. a. auch an der vergleichsweise hohen Wassertemperatur der Salzbahnquelle (39). Für die Modellvorstellung der ^{14}C -Altersbestimmung von Grundwasser ist die auf den ^{14}C - und ^3H -Gehalt der aus der Untermühle Boll (33) untersuchten Probe gestützten Aussage wichtig, daß in Karstgebieten auch unterirdisches Wasser mit Q-Faktoren unter 70 ‰ modern vorkommt (M. A. GEYH, 1970 a, J. C. VOGEL, 1970).

Hydrologisch vorerst nicht erklärlich ist die mit 14 Jahren auffallend geringe mittlere Verweilzeit des Wassers von Heudorf (40). Wegen der fehlenden jahreszeitlichen Abhängigkeit des Tritiumpegels wird Wasser des Typs A vorliegen. Der Tiefbrunnen Volkertshausen liegt bereits im Bereich der quartären Schotter am Rand des die Kategorie II bestimmenden Karstwasserkörpers und enthält daher das in den quartären Schottern abfließende Hochflächenkarstwasser. Eine eigene Alimentation aus den Talalluvionen wird der Brunnen in Stockach Süd (29) haben.

Die nördlich der Donau entnommenen Wässer aus dem Kesselbrunnen (42), dem PW Beuron (36) und dem Großschmiedebrunnen (70) sind den vorher besprochenen sehr ähnlich. Sie gehören dem Karstwasserkörper zwischen dem Albnordrand und dem Donautal an.

Die **Kategorie III** wird durch die Wässer der Entnahmestellen repräsentiert, die westlich der gedachten Trennlinie zwischen Kesselbrunnen und Aachtopf liegen (1, 7, 15, 18, 24, 25, 56, 60, 64, 69 und 72). Es handelt sich fast ausschließlich um Mischungen von Donauwasser und in die quartären Schotter einsickerndem Hochflächenkarstwasser. Unter Annahme eines Verdünnungsfaktors von 60 bis 70 ‰ modern liegen die mittleren Verweilzeiten zwischen 10 und 14 Jahren.

Auf Grund des Nachweises von Keimen und Sporen in den Entnahmestellen 15, 18, 24, 25, 56 und 60 wird ein innerer Zusammenhang zwischen ihnen angenommen. Doch zeigen die individuell sich unterscheidenden Langzeitänderungen des Tritiumpegels, daß eine direkte hydraulische Verbindung durch weite Klüfte ausgeschlossen ist. Während das Wasser aus Engen/Altdorf (24) einem dem Wasser des Aachtöpfes sehr ähnlichen Tritiumjahresgang aufweist, der auch noch, wenngleich in abgeschwächter Form, in den Entnahmestellen 15 und 18 beobachtet werden kann, zeigen die übrigen Wässer der Kategorie III eine von der Jahreszeit unabhängige, konstante Tritiumkonzentration.

Für die Wässer der Entnahmestellen 64, 72 und 69, die sich ebenfalls in den quartären Schottern bewegen, konnte bisher nicht nachgewiesen werden, daß Donauwasser beteiligt ist. Der Vergleich der ^{14}C - und ^3H -Meßergebnisse dieser drei Proben mit den Kurven der Fig. 31 und 32 läßt den Schluß zu, daß auch diese Wässer ganzjährig regeneriert werden.

Für die Wässer aus den Entnahmestellen Hintschingen (1) und Südbargen (7) steht hydrologisch fest, daß sie aus dem Kalkkörper kommen. Der Jahresgang des Tritiumpegels ähnelt sehr dem des Regens. Hier dürfte demnach wieder das von D. B. SMITH et al. (1970) entwickelte Modell der Grundwassererneuerung im Kalkgestein zutreffen.

Genetisch nicht in eine der bisher beschriebenen Kategorien einzuordnen ist das Wasser von der WV Orsingen (63). Sein ^{14}C - und ^3H -Gehalt läßt sich nur mit dem Exponentialmodell vereinbaren, wenn die Grundwasserneubildung auf die Herbst-Frühjahrs-Zeit beschränkt bleibt. Das ist im allgemeinen bei mit Verwitterungsschichten bedeckten Einzugsgebieten erfüllt, wie es hier vorliegen wird. Mit einem Q-Faktor von 85 %modern ergibt sich eine mittlere Verweilzeit von 25 Jahren. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, daß eine Mischung von altem, tritiumfreiem, und jüngerem, tritiumreichem Grundwasser vorliegt.

Zur **Kategorie IV** werden die Grundwässer ohne merkliche Rezentwasserkomponente gerechnet, die in Beuron (10) und in der Thermalquelle Singen (9) anzutreffen sind. Bei Annahme eines Verdünnungsfaktors von 65 %modern errechnen sich Modellwasseralter von 1500 bzw. 14 400 Jahren. Sollte ein Verdünnungsfaktor von 85 %modern zutreffen, erhöhen sich die Alterswerte um 2150 Jahre. Das Grundwasser dieser Kategorie wird nach Süden fließen, da in dieser Richtung eine Zunahme seines Modellalters erfolgt.

Die aus den radiometrischen Daten entwickelte Kategorisierung der im Gebiet der Donauversickerung analysierten Karst- und Grundwässer ist mit der auf hydrogeologische und hydrochemische Beobachtungen gestützten Gruppierung gut zu vereinbaren. Die südlich der Donau befindlichen Quellen im Gebiet der Malmkalkverkarstung, die einer Gruppe zugeordnet sind, schütten Wässer mit mittleren Verweilzeiten

von 10 bis 15 Jahren. Die in den unteren Kieslagen der quartären Schotter südlich von Aach fließenden, gespannten Grundwässer können eine sehr langsame Erneuerung aus ihrem Einzugsgebiet erfahren. Sie bewegen sich in Richtung Bodensee. Ihre Modellwasseralter reichen von einem bis zu vielen Jahrtausenden.

Einem zusammenhängenden Karstwasserkörper entspringen die Quellwässer östlich einer zwischen Aachtopf und dem Kesselbrunnen gedachten Linie. Die mittleren Verweilzeiten liegen — von zwei Ausnahmen abgesehen — zwischen 20 und 25 Jahren. Genetisch ähnliche Wässer treten in den Quellen am nördlichen Donauufer aus.

Mit der ausführlichen Diskussion der Ergebnisse von ^{14}C - und ^3H -Analysen sollte der Wert, aber auch die Problematik der isotonenphysikalischen Untersuchung von rezenten Grundwässern aus dem Karst veranschaulicht werden. Es steht außer Frage, daß mit Vorliegen weiteren, auswertbaren Materials die gewonnenen Vorstellungen über die Genese der Karstwässer im Gebiet der Donauversickerung erweitert werden können. Das generelle Bild wird aber erhalten bleiben, weil es sich schon jetzt mit den hydrogeologischen Beobachtungen vereinbaren läßt.

Herrn Ing. V. RAJNER von der Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Wien, Fräulein E. GÜHLICH und Fräulein J. SIELMANN vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung in Hannover sei für die sorgfältige Durchführung der Isotopenanalysen gedankt.

3. Der kombinierte Markierungsversuch 1969

3. 1. Eingabestellen und Markierungsmittel

Bei dem Großversuch 1969 im Bereich der Donauversickerung war nicht bezweckt, die früheren Versuche lediglich zu wiederholen, sondern mit den zur Verfügung stehenden Markierungsmitteln ein möglichst umfassendes karsthydrologisches Bild zu erhalten.

Der Einsatz der Markierungsmittel mußte so gewählt werden, daß sie sich gegenseitig nicht störten. Dies war um so notwendiger, als aus organisatorischen und hydrologischen Gründen alle Mittel zum selben Zeitpunkt eingespeist werden sollten. Es standen folgende 13 Markierungsstoffe zur Verfügung:

- 2 Farbstoffe (Uranin, Sulforhodamin G extra)
- 2 Salze (Natriumchlorid, Kaliumchlorid)
- 2 verschiedene Farben von Lycopodiumsporen (braun und grün)
- 2 aktivierungsanalytische Stoffe (Lanthan, Brom)
- 2 Duftstoffe (Dipenten, Isobornylazetat)

- 1 Schaumstoff (harte und weiche Detergentien)
- 1 aktives Isotop (Chrom-51)
- 1 Bakterienart (*Serratia marcescens*)

Die angewandten Stoffe sind nicht alle als gleich empfindlich anzusprechen, d. h., mit den zu vertretenden Einspeisemengen war bei vergleichweisem Einsatz nicht überall derselbe Effekt zu erzielen. Daher mußten die empfindlichen Mittel an den von der Hauptaustrittsstelle Aachquelle weiter entfernten Orten eingespeist werden. Umgekehrt war es erforderlich, solche Stoffe, mit denen ein geringer Effekt zu erwarten war oder mit denen noch nicht genügend Erfahrung vorlag, näher bei der Aachquelle oder bei den bereits bekannten Hauptdurchzugsbahnen einzusetzen. In einer Sitzung am 6. Juni 1969 in Tuttlingen legten die beteiligten Fachleute folgenden Eingabeplan fest (Taf. I):

- A. Immendinger Donauschwinden: Kaliumchlorid + Dipenten.
 - B. Doline nördlich Stetten: Sulforhodamin G extra.
 - C. Untersuchungsbohrloch für die Autobahnbrücke nördlich Engen: Brom als Ammoniumbromid.
 - D. Donauschwinden der Fridinger Schleife: Lanthan + Chrom-51.
 - E. Sickerschacht der Lehmgrube östlich Liptingen: Detergentien + Isobornylazetat.
 - F. Weißjura-Massenkalk-Steinbruch südlich Buchheim: Uranin.
 - G. Hauptversickerung der Donau am „Brühl“ zwischen Immendingen und Möhringen: *Serratia marcescens* + braungefärbte *Lycopodium*-sporen.
 - H. Doline im südlichen Stadtgebiet von Tuttlingen: Natriumchlorid (= Steinsalz).
 - I. Doline östlich Neuhausen o. E.: grüngefärbte *Lycopodium*-sporen.
- Einspeisungszeit und Eingabemenge sind Tafel IV zu entnehmen.

Bei den Immendinger Donauschwinden, die rund 2 km oberhalb der Hauptversickerung liegen, war noch nie ein Markierungsversuch unternommen worden. Obwohl anzunehmen war, daß auch die dort ver-sitzenden Wässer im wesentlichen zur Aachquelle fließen, mußten dort erprobte Markierungsmittel zum Einsatz kommen. Man glaubte, dieser Forderung am besten damit Genüge zu tun, wenn man bei der Einspeisestelle A Kalisalz und den Duftstoff Dipenten eingab.

Für die Eingabestelle B beim Hegaublick kam zwangsläufig nur Rhodamin G extra in Frage, da diese Stelle gerade entgegengesetzt der mit Uranin beschickten Stelle F bei Buchheim lag. Damit war eine gegenseitige Störung der beiden fluoreszierenden Farbstoffe weitgehend ausgeschlossen.

Die am nächsten bei der Aachquelle liegende Einspeisestelle C wurde mit dem nicht sehr empfindlichen Brom (als Ammoniumbromid) für die Aktivierungsanalyse beschickt.

In der Fridinger Schleife (D) sind schon mehrere Färb- und Salzungsversuche durchgeführt worden, daher konnte man bei diesem Versuch neue, im süddeutschen Karst bisher noch nicht verwendete Mittel erproben. Es kamen dort das aktivierungsanalytische Mittel Lanthan (als Lanthannitrat) und das aktive Isotop Chrom-51 (als Komplex) zur Eingabe.

Nicht einfach war das Auffinden von geeigneten Eingabestellen in dem Gebiet zwischen der Donau und dem Hegau, das „die Eck“ genannt wird. Obwohl dieses Gebiet überwiegend aus Weißjura-Kalken aufgebaut ist, finden sich fast nirgends offene Dolinen, die als ideale Einspeisemöglichkeit dienen könnten. Bilden sich je einmal Erdfälle durch Einsturz unterirdischer Hohlräume, so werden diese in der Regel in kurzer Zeit von den Bewohnern des umliegenden Gebietes wieder eingeebnet. Ältere und größere Dolinen besitzen alle mehr oder weniger mächtige Lehmböden, so daß auch diese nicht ohne weiteres beschickt werden können. Im Südteil des „Eck“ lagern Schichten der Molasse auf den Weißjura-Kalken, die in der Regel so gut wie undurchlässig sind. Dort sind Eingabemöglichkeiten nur in den tief eingeschnittenen Tälern vorhanden.

Östlich Liptingen wurden noch vor einigen Jahren die wenige Meter mächtigen Lehmschichten der Bohnerzformation abgebaut. Die Lehmgrube wurde in den darunter anstehenden Weißjura-Kalk entwässert. Der dortige Entwässerungsschacht diente als Eingabestelle E für die Detergentien und den Duftstoff Isobornylacetat.

An der östlichen Grenze des mutmaßlichen Einzugsgebietes der Aachquelle südlich Buchheim, und von allen Eingabestellen am weitesten von der Aachquelle entfernt, wurde das empfindlichste aller Markierungsmittel, das Uranin, eingegeben. Es war anzunehmen, daß das Markierungsmittel von dieser Stelle zunächst längere Zeit benötigt, um in das Karstwasser zu gelangen. Ferner dürfte in diesem Grenzbereich die Grundwassergeschwindigkeit die geringste des gesamten Versuchsgebietes sein. Der bei Buchheim (F) eingegebene Farbstoff konnte möglicherweise sowohl nach Norden als auch nach Osten oder Südwesten strömen.

Die Hauptversickerungsstelle der Donau zwischen Immendingen und Möhringen ist mehrfach der Ort von Markierungsversuchen gewesen. Hier wurde übrigens 1877 Uranin überhaupt das erstmalig zu Markierungszwecken verwendet. Der Laufweg und die Laufgeschwindigkeit der dort eingespeisten Stoffe war seit über neun Jahrzehnten bekannt, so daß man an dieser Stelle getrost neue und weniger erprobte Stoffe einsetzen konnte. Da im süddeutschen Karst die Verwendung von Sporen bisher noch nicht über das Versuchsstadium hinaus kam, war die Eingabe von (braungefärbten) Sporen bei der Hauptversickerung (Eingabestelle G) gerechtfertigt. Lycopodiumsporen als Markierungsmittel haben sich vor allem in alpinen Karstgebieten bewährt. Das umfassende

karsthydrologische Untersuchungsprogramm im Bereich der Donauversickerung bot nun Gelegenheit, die Sporenriftmethode auch unter den anders gearteten Karstwasserverhältnissen der Schwäbischen Alb zu testen. Fraglich war besonders das Verhalten der Lycopodiumsporen in längeren Druckstrecken, wie wir sie für den überdeckten Karst am Südrand der Alb und für die Wasserwege unterhalb der in den Karstwasserspiegel eintauchenden weniger durchlässigen Kimmeridge-Mergel annehmen müssen.

Der gleichzeitige Einsatz eines anderen Triftkörpers, nämlich Keime von *Serratia marcescens*, an derselben Stelle konnte die Ergebnisse mit der Sporenrift festigen.

Vom Stadtgebiet von Tuttlingen war bekannt, daß eine Grundwasserversickerung stattfindet. Teile des nördlich der Donau gelegenen und das gesamte Stadtgebiet südlich der Donau weist Grundwasserstände unter dem Donauspiegel auf. Eine alte Doline im südlichen Stadtteil, die als Hochwasser-Schluckstelle ausgebaut worden war, bot die Möglichkeit, größere Mengen eines Markierungsmittels einzugeben (H). Die Stadtverwaltung Tuttlingen beschaffte entgegenkommender Weise die große Menge von 50 Tonnen Steinsalz, und das Tiefbauamt schuf die technischen Voraussetzungen für die Auflösung und Eingabe.

In der Umgebung von Neuhausen o. E. sind in den vergangenen Jahren zwei Färbversuche durchgeführt worden, wobei die Farbe in aufgeschürfte Dolinen zur Einspeisung kam. Eine dieser Farbeingabestellen ist inzwischen als Schluckstelle für die geklärten Abwässer der Kläranlage Neuhausen ausgebaut worden. Zum Vergleich mit den früheren Markierungsversuchen war das Verhalten von Triftkörpern aus dem Zwischengebiet wissenswert. Daher wurden in diese Versickerungsstelle grünegefärbte Sporen eingebracht (I).

Alle Einspeisestellen an der Donau waren so ausgewählt und so hergerichtet, daß auch bei stärkerer Wasserführung der Donau, selbst bei nicht zu starkem Hochwasser, die Einspeisung zum vorher bestimmten Versuchszeitpunkt verlustlos vorgenommen werden konnte. Daß diese Vorsorge notwendig war, zeigt die Tatsache, daß die Donau zwölf Stunden nach der Einspeisung Hochwasser führte und die Periode der Vollversickerung damit beendet war.

3. 2. Die Beobachtungsstellen und deren Kontrolle

In das Beobachtungsnetz mußten alle diejenigen Quellen, Brunnenbohrungen und Oberflächengewässer aufgenommen werden, bei denen die Möglichkeit eines Austritts eines Markierungsmittels bestand. Außer dem Hauptaustritt, der Aachquelle, waren dies 32 Stellen. Ferner wurde die Donau bei Immendingen (Nr. 2) auf die Grundlast einiger Markierungsmittel beobachtet, nämlich auf Kalium, Natrium, Chlorid, Detergentien und *Serratia marcescens*. Die durch die Beobachtungsstellen

erfaßte Fläche beträgt 505 qkm. Im Südwesten des eigentlichen Beobachtungsgebietes wurden außerdem noch stichprobenweise 3 Wasservorkommen auf das Markierungsmittel der Einspeisestelle B untersucht.

In der Tabelle 4 sind alle Probenahmestellen des Versuchsgebietes aufgeführt. Die Numerierung ist nicht durchgehend, sondern enthält Lücken, da bei den vorbereiteten Untersuchungen zunächst auch solche Wasseraustritte beprobt wurden, die später nicht in das Beobachtungsnetz aufgenommen worden sind. Um Verwechslungen zu vermeiden, behielt man die anfängliche Numerierung bei. Die Nummern wurden in der Reihenfolge der erstmaligen Untersuchung gegeben, daher sind sie weder geographisch noch geologisch, noch hydrographisch geordnet.

Tabelle 4: Verzeichnis der Probennahmestellen

Beobachtungsstelle		Entnahmen zur Untersuchung auf Markierungsmittel von:									
Nr.	Ort	Bezeichnung u. Lage	A	G	B	C	D	E	F	H	I
8	Aach	Aachtopf	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1	Hintschingen	Quelle 1000 m südl. des Ortes			+						
2	Immendingen	Donauwasser	+					+		+	
7	Bargen	Quelle 1000 m südwestl. des Ortes	+	+							
10	Beuren a. d. A.	Tiefbrunnen	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11	Eigeltingen	Untere Kressenlochquelle					+	+	+		+
12	Eigeltingen	Obere Kressenlochquelle	+				+	+	+	+	+
13	Eigeltingen	Brunnenstube der WV						+	+	+	+
15	Ehingen	Bitzenquelle (Brunnenstube der WV Singen)	+	+	+						
16	Ehingen	Quelle 1000 m nördlich des Ortes	+	+	+						
18	Welschingen	Bleichequelle	+	+	+						
21	Kirchenhausen	Quelle 1000 m nördlich des Bahnhofes			+						
22	Zimmerholz	Brunnenstube 200 m westl. des Ortes			+						
23	Stetten	Quelle 100 m südlich des Ortes			+						
24	Engen-Altdorf	Alte Fassung	+	+	+						
25	Engen	Tiefbrunnen der Felsenbrauerei	+	+	+						
26	Welschingen	Quelle 500 m südlich des Ortskernes	+	+	+						
27	Aulfingen	Quellgruppe Dorsteltal			+						

Beobachtungsstelle Nr. Ort	Bezeichnung u. Lage	Entnahmen zur Untersuchung auf Markierungsmittel von:								
		A	G	B	C	D	E	F	H	I
30 Altheim	Tiefbrunnen									+
31 Leibertingen	Roter Brunnen									+
33 Boll	Fassung 150 m unterhalb der Untermühle							+	+	+
34 Heudorf b. M.	Karstquelle Mettenbachtal 1500 m südwestlich des Ortes									+
35 Beuron	Donauwasser im Stauraum Bronner Mühle					+			+	
36 Beuron	Pumpwerk 500 m nördlich des Ortes					+			+	
37 Thiergarten	Reinbrunnen 700 m unterhalb Neumühle Donautal									+
39 Eigeltingen	Salzbahnquelle					+	+	+		+
40 Heudorf b. M.	alte Fassung 350 m nordw. der Kirche								+	
56 Welschingen	Bohrung der WV westl. Hegau bei der Bleichequelle (Beob.-Stelle 18)	+	+	+	+	+	+	+	+	+
60 Neuhausen	Tiefbrunnen der WV Neuhausen-Engen	+	+	+						
64 Aach	Wasserbohrung südl. des Ortes	+	+	+				+		
66 Kirchenhausen	südlich Brunnenstube Kilteltal				+					
67 Zimmerholz	Ulrichsquelle				+					
69 Volkertshausen	Brunnen der Spinnerei Ten Brik	+	+			+		+	+	
71 Kirchenhausen	Kilteltal, Quelle im Gewann Bärtel				+					

Die größte Aufmerksamkeit wurde naturgemäß der Hauptaustrittsstelle, der Aachquelle (Nr. 8), gewidmet. Dort sind auch die dichtesten Probenahmen vorgenommen worden. Der Bürgermeister der Stadt Aach ermöglichte es in dankenswerter Weise, daß in den Räumen des alten Schulhauses sowohl die Sammelstelle für die Wasserproben als auch ein Untersuchungslaboratorium eingerichtet werden konnte. Eine kleine Elektropumpe förderte vom Einlauf zum Elektrizitätswerk Aach über eine 6-mm-Schlauchleitung einen ständigen Wasserstrom in das Untersuchungslaboratorium. Dort konnten also jederzeit Repräsentativproben des Aachwassers entnommen werden.

Die Entfernung von der Aachquelle bis zum Elektrizitätswerkseinlauf beträgt 650 m. Das Wasser legte diese Strecke in 6 $\frac{1}{2}$ Minuten zurück; von dort bis zum Untersuchungslaboratorium brauchte es weitere 1 $\frac{1}{2}$ Minuten. Die Verzögerung, die dadurch entstand, ist also ohne Belang. Im behelfsmäßig eingerichteten Laboratorium in Aach sind über drei Wochen, und zwar bis zum 14. September 1969, die gesamten Untersuchungen auf Kalium, Natrium, Chlorid, Detergentien und die Direktbestimmung von Uranin durchgeführt worden. In einem weiteren Raum erfolgten im selben Zeitraum die bakteriologischen Untersuchungen auf *Serratia marcescens*. Die Filtration der 2,8-l-Wasserproben durch Aktivkohle-Filter zur Spurenbestimmung von Uranin wurde im Sammel- und Ausgaberaum für die Probeflaschen vorgenommen. Ein großer Teil dieser Aktivkohle-Filter wurde an Ort und Stelle weiter verarbeitet. Die Voruntersuchungen auf Rhodamin G extra erfolgte am Auslauf der 6-mm-Leitung über ein Turner-Fluorometer mit Schreiber.

Durch die Untersuchungen an Ort und Stelle konnte der Aufwand an Probenflaschen verhältnismäßig klein gehalten werden, da die entleerten Probengefäße sofort wieder zum Einsatz kamen. Die Proben für die hier nicht aufgeführten Untersuchungsarten kamen zum Versand in die Speziallaboratorien. Teilweise waren dies Proben, die in größeren Zeitabständen entnommen worden sind, z. B. Proben für die Untersuchungen auf Lanthan oder Chrom-51, z. T. waren es geringere Probenmengen, z. B. Proben für die Untersuchungen auf Rhodamin G extra oder auf Brom.

Zur Vermeidung von Verwechslungen ist jeder Untersuchungsart eine eigene Flaschenform zugeordnet worden. Bei Glasflaschen wurden grundsätzlich braunes Glas und nach Möglichkeit die raumsparenden Rechteckflaschen verwendet. Bei gleicher Flaschengröße kamen verschiedene Formen der Flaschen zum Einsatz. Die Aufstellung in der Tabelle 5 gibt einen Überblick über die verwendeten Probengefäße. Führte eine Arbeitsgruppe mehrere Untersuchungsarten durch, so konnten die Proben in einer Flaschenform abgefüllt werden, z. B. bei Untersuchungen auf Natrium, Kalium, Chlorid und Direktmessung von Uranin.

Die Probennahmestellen im äußersten Westen des Versuchsgebietes brauchten nur auf die Rhodamin-Einspeisung der Eingabestelle B beobachtet zu werden (vgl. Tafel 1). Der an der Eingabedoline vorbeiführende Bachlauf versickert im Kilteltal nach wenigen hundert Metern und tritt rund 2 km unterhalb der Eingabestelle wieder auf. Dort war die Entnahmestelle Nr. 71. Nahe am Ausgang des Kilteltales befindet sich die Brunnenstube der Wasserversorgung Kirchen-Hausen (Nr. 66). Am Nordostende des Ortsteiles Hausen entspringt aus einem kleinen Karstrichter die Quelle Nr. 21. Die Quelle Nr. 1 südlich Hintschingen fiel im Lauf des trockenen Herbstes 1969 trocken. Auf Markung Aul-

Tabelle 5: Arten der Probenahme

Einspeisestelle	Markierungsstoff		Art der Probenahme
A	Kalidüngesalz Duftstoff Dipenten		250-ml-Glasflaschen, rechteckig 100-ml-Glasflaschen, rechteckig
B	Sulforhodamin G extra		100-ml-Glasflaschen, rund
C	Brom		100-ml-Kunststoffflaschen, rechteckig
D	Chrom-51 Lanthan		5-1-Kunststoffkanister, viereckig 2-1-Kunststoffflaschen, rund
E	Detergentien, Duftstoff Isobornylazetat	kolorimetrische Messung: Schaumhöhenmessung:	500-ml-Glasflaschen, rund 500-ml-Glasflaschen, rechteckig 100-ml-Glasflaschen, rechteckig (wie oben)
F	Uranin	Direktmessung: Aktivkohlefilter: Aktivkohle:	250-ml-Glasflaschen, rechteckig (wie oben) 2,8-1-Glasflaschen, rund Aktivkohlebeutel zum Einhängen
G	Keime braune Sporen		10-ml-Glasröhrchen, steril, in Al-Hülsen Planktonnetzproben in 30-ml-Glasflaschen
H	Streusalz		250-ml-Glasflaschen, rechteckig (wie oben)
I	grüne Sporen		Planktonnetzproben in 30-ml-Glasflaschen

fingen liegt in einer Talgabel die kleine Quelle Nr. 27, wo unter der Juranagelfluhe der Weiße Jura zutage tritt. Auch die Quelle Nr. 23 bei Stetten kommt unmittelbar unter der Juranagelfluhe hervor. Die Ulrichsquelle (Nr. 67) ist eine für die Gemeinde Zimmerholz genutzte Karstquelle. Nr. 22 am westlichen Dorfrand von Zimmerholz ist nicht mehr genutzt.

Im Raum Engen waren die Beobachtungsstellen außer auf Rhodamin auch auf die Einspeisemittel bei der Immendinger Donauversickerung (A), bei der Hauptversickerung am Brühl (G) und bei der Einspeisestelle C „Im Tal“ zu untersuchen. Die Quelle Nr. 7 ist eine schwache Quelle südlich Barga; sie wurde nur stichprobenweise kontrolliert. Die Quelle Nr. 24 im Engener Stadtteil Altdorf ist eine recht kräftige Karstquelle, die ehemals der Wasserversorgung Engen diente. Heute wird sie wegen ihrer nicht ganz einwandfreien bakteriologischen Beschaffenheit lediglich im Sommer über eine Aufbereitungsanlage für das Schwimmbad Engen verwendet. Die Tiefbohrung der Felsenbrauerei Engen (Nr. 25) dient ausschließlich der Brauerei. Am Westrand des Dorfes Neuhausen fördert die Tiefbohrung Nr. 60 aus würmeiszeitlichen Kiesen Wasser für die Versorgungsgemeinschaft Engen-Neuhausen. Südöstlich Welschingen kommt aus einem Quelltümpel die Drachenlochquelle (Nr. 26). Diese und die folgenden 4 Quellen kommen nicht unmittelbar aus dem Karst, sondern aus pleistozänen Schottern. Sie dürften jedoch ihr Wasser aus dem darunterliegenden Weißen Jura beziehen.

Die Bleichequelle (Nr. 18) ist neben der Aachquelle die stärkste Quelle des gesamten Untersuchungsgebietes, wenn man von Hochwässern beim Roten Brunnen (Nr. 31) absieht. Sie schüttet sehr gleichmäßig 35 l/s. In unmittelbarer Nachbarschaft — nur 200 Meter nördlich — wurde 1968/1969 eine Tiefbohrung für die Wasserversorgungsgruppe „Westlicher Hegau“ niedergebracht. Sie erschloß im unteren Kieslager überflurgespanntes Wasser mit einer Schüttung von rund 43 l/s (Nr. 56). Eine recht kräftige Schüttung von rund 12 l/s weist auch die für die Wasserversorgung der Stadt Singen gefaßte Bitzenquelle (Nr. 15) auf. Wie die Bitzenquelle liegt auch die Quelle Nr. 16 auf der Gemarkung Ehingen, und zwar 400 m nordwestlich des Kirchturmes Ehingen. Sie entspringt am Fuß eines Moränenhügels. Die Brunnenbohrungen für die Stadt Aach (Nr. 64), für die Spinnerei nördlich Volkertshausen (Nr. 69) und für die Gemeinde Beuren a. d. A. (Nr. 10) beziehen ihr Wasser ebenfalls aus pleistozänen Kiesen. Die Obere (Nr. 12) und die Untere Kressenlochquelle (Nr. 11) sind kleine Karstquellen im Krebsbachtal nördlich Eigeltingen. 200 m oberhalb der Oberen Kressenlochquelle befindet sich die Fassung für die Wasserversorgung der Gemeinde Eigeltingen, die außer Karstwasser auch uferfiltriertes Grundwasser nutzt (Nr. 13). Eine Quelle mit erhöhter Durchschnittstemperatur ist die Salzbahnquelle (Nr. 39), 1,7 km nordöstlich des Ortskernes von Eigeltingen. Bei Auf-

schürfungen im Herbst 1969, die den Zweck hatten, die Salzbahnquelle für umliegende Aussiedlerhöfe zu fassen, wurden unter 6 m Moränenmaterial die Kalke des Oberen Weißen Jura erschlossen.

Zwischen der Salzbahnquelle und der kleinen Karstquelle rund 200 m unterhalb der Untermühle bei Boll (Nr. 33) liegen 13 km nicht beobachtbares Gebiet. Die in diesem Gebiet austretenden Quellen sind ausschließlich Wasseraustritte, die aus dem Pleistozän kommen. Der Weiße Jura tritt dort lediglich im tief eingeschnittenen Tal der Stockacher Aach an zwei Stellen unmittelbar nördlich und südlich von Hopetenzell zutage. Karstquellen sind dort nicht bekannt. Eine kleine Karstquelle liegt im Mettenbachtal 1,5 km südsüdwestlich von Heudorf bei Meßkirch (Nr. 34). Mit Nr. 40 wurde die ehemals für die Wasserversorgung der Stadt Meßkirch genutzte Brunnenstube beim Punkt 635,5 m am nordwestlichen Dorfrand von Heudorf b. M. bezeichnet. Die in den Kalken des Oberen Weißen Jura abgeteufte Bohrung für die Wasserversorgung der Gemeinde Altheim — 1000 m südwestlich von Altheim — erhielt die Nr. 30.

Zur Untersuchung, ob die Einspeisungen bei der Eingabestelle D auch wirklich in den Untergrund erfolgten, sind im Stauraum der Donau bei der Bronner-Mühle Proben entnommen worden (Nr. 35). Die dort gezogenen Proben wurden außerdem auf Uranin von der Einspeisestelle F geprüft.

Das neue Pumpwerk von Beuron — nördlich der Donau gelegen — wurde mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen (Nr. 36).

Ein ausgesprochener Karstwasseraustritt ist der Rote Brunnen, der sich 1 km nordwestlich Leibertingen wenige Meter über der Donau befindet (Nr. 31). Es ist praktisch der Austritt des Höhlenbachs der Rote-Brunnen-Höhle, die vor allem in der La-Tène-Zeit besiedelt war.

Die am weitesten im Nordosten des Beobachtungsgebietes gelegene Entnahmestelle ist der Reinbrunnen am südlichen Donauufer, 1,5 km oberhalb Thiergarten (Nr. 37). Er wird für die Standortverwaltung Stetten a. k. M. genutzt.

Zwar liegen im Untersuchungsgebiet noch weitere kleine und kleinste Wasseraustritte, jedoch wurden sie nicht in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, da dort nirgends ein Austritt von Markierungsmitteln zu erwarten war. Teilweise entspringen sie aus höheren Schichten, die mit keiner der Einspeisestellen in hydrologischem Zusammenhang stehen, z. T. war auf Grund ihrer geringen Schüttung lediglich ein sehr kleines Einzugsgebiet anzunehmen.

Für die Aachquelle wurden verschiedene Entnahmerhythmen festgelegt, je nachdem die Untersuchungsarten verhältnismäßig einfach oder aufwendiger waren. Für die einfacheren Untersuchungen auf Natrium, Kalium, Chlorid, Rhodamin, Brom, Keime sowie für die Direktmessung von Uranin wurde in der Woche, in der der Versuch begann (26.—31. August 1969), stündlich eine Probe entnommen. In der zweiten

Versuchswoche (1.—7. September) war der Probenabstand zweistündlich. Für die etwas aufwendigeren Untersuchungen auf Lanthan, Chrom-51, Detergentien und auf Uranin mit Aktivkohlefilter und mit Aktivkohlesäckchen wurde die Beprobung der Aachquelle in der ersten und zweiten Versuchswoche vierstündlich vorgenommen. In der dritten Versuchswoche entnahm man für alle Untersuchungsarten alle 6 Stunden Proben.

Auch im übrigen Untersuchungsgebiet waren unterschiedliche Proben-dichten festgelegt. Die den Einspeisestellen näher liegenden Beobachtungsstellen, z. B. die Zimmerholzer Quellen Nr. 22, 23 und 67, wurden zunächst alle 4 Stunden beprobt. Die Entnahmestellen am Rand des Versuchsgebietes, z. B. die Quellen im Ehinger-Beurener Raum Nr. 10, 15 und 16 oder die Salzbahnquelle östlich Eigeltingen, wurden täglich nur einmal untersucht.

Außer beim Behelfslaboratorium waren in der ersten Versuchswoche 6 Beobachtungsgruppen mit 10 Personen im ständigen Einsatz. In der zweiten und dritten Versuchswoche wurden die Zeitabstände der Probeentnahmen gestreckt. Nach der dritten Versuchswoche befanden sich lediglich bei den möglichen Hauptaustrittsstellen (Aachquelle Nr. 8, Obere Kressenlochquelle Nr. 12, Tiefbrunnen Altheim Nr. 30, Roter Brunnen Nr. 31 und Reinbrunnen Nr. 37) ortsansässige Probenehmer in Bereitschaft, um bei Hochwasser Proben sicherzustellen. Bis zum Frühjahr 1970 ist das Versuchsgebiet bei einer ausgewählten Anzahl von Beobachtungsstellen monatlich zweimal beprobt worden. Die ausgewählten Stellen waren: die Aachquelle Nr. 8 sowie die Probenahmestellen Nr. 1, 10, 12, 15, 18, 22, 24, 25, 30, 31, 33, 34, 37, 39, 40, 56, 60, 64 und 69.

Nachdem Ende 1969 die Hauptaustritte einer großen Anzahl von Markierungsmitteln feststanden, wurden ab 1970 nur noch die Entnahmen für Uranin von der Einspeisestelle F und für Sporen von den Einspeisestellen G und I durchgeführt.

3. 3. Durchführung und Ergebnisse der Markierungsversuche

3. 3. 1. Die Ergebnisse mit Kalidüngesalz (Eingabestelle A)

Am südlichen Ufer der Donau, gegenüber Immendingen, befinden sich auf einer Strecke von rund 120 m etwa sechs mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Versickerungsstellen (s. Fig. 36). In die stärkste von diesen bei Flußkilometer 177,115 strömten zur Versuchszeit 100 bis 150 l/s Donauwasser ein (s. Fig. 37). Unter dem anstehenden Auelehm zeigt sich an den Versickerungsstellen Lockermaterial von Faust- bis Kopfgröße, bestehend aus Weißjurakalk, wahrscheinlich ausgespülter Hangschutt.

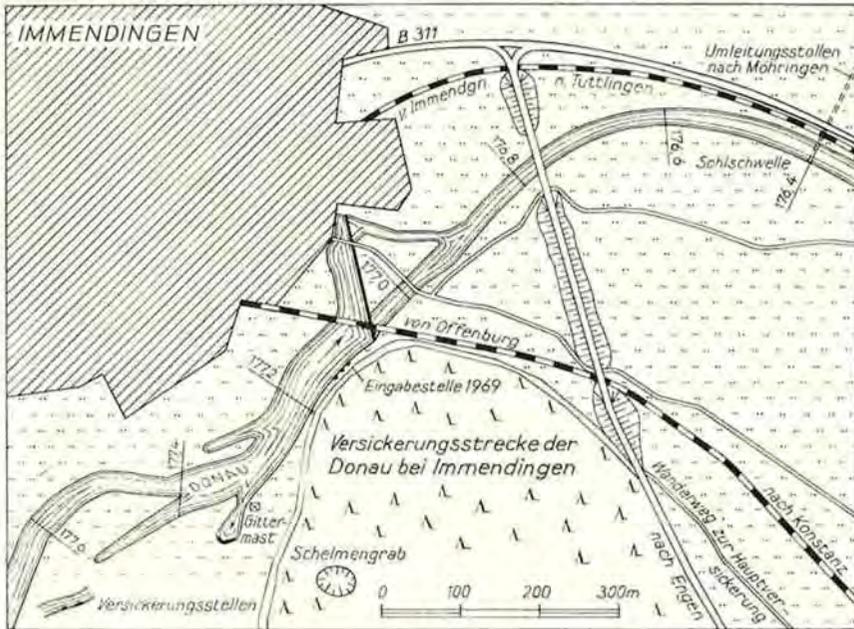


Fig. 36: Lageplan der Immendinger Donauschwinden (Einspeisestelle A).

Unter Mithilfe des Wasserwirtschaftsamtes Donaueschingen wurde am 26. August 1969 die Einspeisung von 1000 kg Kalidüngesalz (mindestens 60% K_2O) vorgenommen.

Das in 50-kg-Säcken aus dem Kaliwerk Gewerkschaft Baden in Buggingen/Landkreis Müllheim angelieferte Kalidüngesalz wurde unter der Leitung von G. STRAYLE zwischen 12.35 Uhr und 12.40 Uhr in die Schluckstelle eingestreut. Der rasche Zustrom von Donauwasser bewirkte, daß innerhalb kurzer Zeit das leicht lösliche Kalisalz vollkommen eingespült war.

Die Untersuchung auf die Kaliumführung der Untersuchungswässer erfolgte im Behelfslaboratorium im Rathaus Aach. Die Untersuchung wurde durchgeführt mit dem Flammenzusatz zum Zeiss-Spektralphotometer PMQ II des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg unter der Leitung von W. Käss. Die Flamme mit direkter Zerstäubung wurde mit Knallgas betrieben.

Nur an einer einzigen Stelle, und zwar an der Aachquelle, trat eine Kaliumerhöhung auf (s. Fig. 38). Obwohl das Aachwasser die für Karstwasser rund zehnfach erhöhte Kaliumgrundlast von rund 3 mg K/l führte, war eine Erhöhung des Kaliumgehaltes infolge der Einspeisung nachzuweisen. In der Aachquelle wurden in stündlichem Abstand



Fig. 37: Eingabe von Kalidüngesalz in die Immendinger Donauschwinden (Foto: W. Käss, 1969).

Proben entnommen, so daß eine genaue Aussage auch über kurzzeitige Schwankungen gemacht werden kann. Erstmals am 27. August um 23.00 Uhr war eine eindeutige Erhöhung des Kaligehaltes feststellbar. Die höchste gemessene Kaliumkonzentration trat am 29. August um 7.00 Uhr auf. Wie sich jedoch später herausstellte, war diese maximale Kaliumführung nicht ausschließlich auf die Kaliumeinspeisung bei Immendingen zurückzuführen. Das im südlichen Stadtgebiet von Tuttlingen eingespeiste Streusalz enthielt neben dem Hauptbestandteil Natriumchlorid noch 0,77 % Kalium. Noch während der erhöhten Kaliumführung in der Aachquelle trat am 29. August die von Tuttlingen herrührende Natriumchloridwelle in der Aach aus. Unter Berücksichtigung der Natriumchloridkonzentrationen wurde der Kaliumanteil ermittelt und an der Kaliumführung der Aach in Abzug gebracht. Zur Zeit der höchsten Natriumchloridführung der Aachquelle betrug die durch die Kaliumverunreinigung verursachte Kaliumerhöhung 0,22 mg K/l. In der Abbildung der Kaliumgangkurve ist die reduzierte Kaliumkurve eng punktiert dargestellt (s. Fig. 38). Nach dem Durchgang der Kalium- und Natriumchloridwellen sank der Kaliumgehalt unter 3 mg K/l ab. Dadurch ist es schwierig, eine Bezugskurve für die wahre Kaliumerhöhung zu ermitteln. Für die in der Darstellung angenommene

Bezugslinie läßt sich über die Schüttung in der Aachquelle ein Wieder- ausbringen von rund 500 kg Kalium errechnen. Dies bedeutet, daß das eingegebene Salz weitgehend in der Aachquelle wieder ausgetreten ist. Die beiden höchsten Konzentrationserhöhungen treten am 28. August um 2.00 Uhr und um 19.00 Uhr mit 0,40 und 0,44 mg K/l auf.

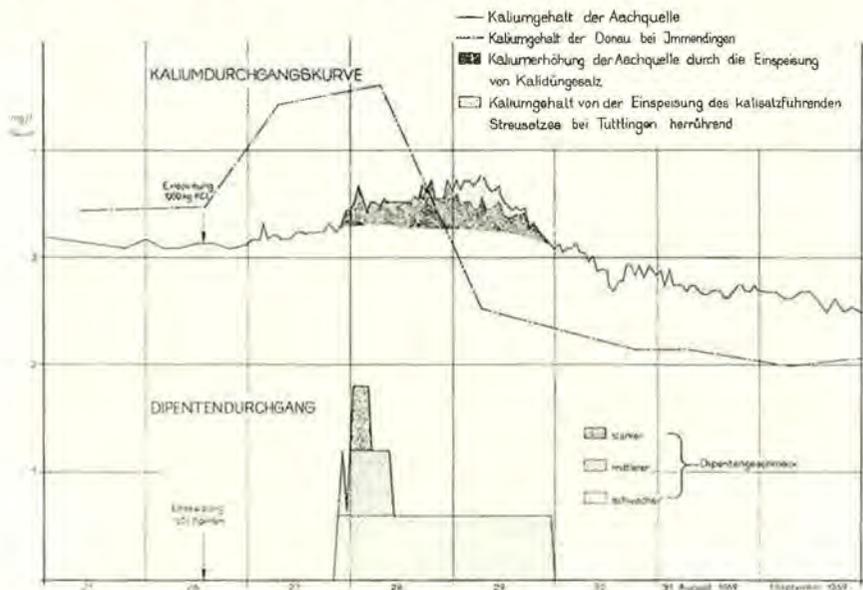


Fig. 38: Kaliumkurve der Aachquelle vom 25. August bis 1. September 1969. Tägliche Kaliumgehalte der Donau bei Immendingen. Halbquantitative Darstellung des Dipenten-Geschmacks in der Aachquelle.

Die bei diesem Versuch eingesetzte Kalisalzmenge ist das Minimum, das eingesetzt werden konnte. Eine geringere Menge Kalisalz oder eine längere Verweildauer im Untergrund hätte zu keinem eindeutigen Ergebnis geführt. Die Schwierigkeiten in der Erkennung des Wiederaustritts liegen sowohl in der Höhe der Kaliumgrundlast als auch in seiner Schwankung begründet. Eine statistische Berechnung über die Fehlergrenzen kann wegen der Schwankungen der Grundlast nicht angegeben werden.

Aus der Donau wurden über die Versuchszeit einmal täglich Proben entnommen und zum Vergleich auf Kalium untersucht. Es zeigte sich, daß am Tag nach der Einspeisung wohl infolge der Hochwasserführung der Donau ein erhöhter Kaliumgehalt auftrat, der noch einen weiteren Tag anhält. Ab 29. August sank der Kaliumgehalt unter die Werte der Zeit vor der Einspeisung und vor dem Hochwasser. Erst ab 5. September sind wieder ansteigende Werte zu verzeichnen.

Die erhöhten Kaliumwerte der Donau unmittelbar nach der Ein-

speisung bringen eine gewisse Unsicherheit in der Beurteilung der von der Einspeisung herrührenden Kaliumwelle mit sich. Da jedoch die verstärkte Wasserführung der Donau erst etwa elf Stunden nach der Einspeisung einsetzte, dürfte der Einfluß zumindest auf den Beginn der Kaliumwelle in der Aach gering sein. Aus der Kurvendarstellung geht auch eindeutig hervor, daß die Kaliumgrundlast erst am Abend des 29. August absinkt.

Eine Sicherung für die durch die Einspeisung des Kalisalzes erzeugte Kaliumwelle bietet die halbquantitative Durchgangskurve des Dipentens.

Die Kaliumgehalte der weiteren Beobachtungsstellen, die jedoch keine Kaliumerhöhung durch die Kalidüngesalzeinspeisung bei Immen- dingen aufwiesen, geben folgende Aufstellung:

Tabelle 6: Kaliumgehalte von Beobachtungsstellen, die nicht von der Kali- düngesalzeinspeisung betroffen wurden

Nr.	Bezeichnung	Beobachtungs- zeitraum	Anzahl der Proben	Durchschnitt- licher Kalium- gehalt (mg/l)
7	Bargen	27. Aug. bis 7. Sept. 1969	10	2,65
10	Beuren a. d. A., Wasserversorgung	27. Aug. bis 3. Nov.	24	2,07
12	Eigeltingen, Ob. Kressenloch- quelle	25. Aug. bis 3. Nov.	48	3,52
15	Ehingen, Bitzen- quelle	25. Aug. bis 7. Sept.	14	0,77
16	Ehingen, Wiesen- quelle	25. Aug. bis 7. Sept.	14	1,38
18	Welschingen, Bleiche	25. Aug. bis 7. Sept.	27	3,71
24	Engen-Altendorf	25. Aug. bis 7. Sept.	36	3,88
25	Engen, Felsen- brauerei	25. Aug. bis 7. Sept.	36	3,95
26	Welschingen, Drachenlochquelle	25. Aug. bis 7. Sept.	14	4,42
56	Welschingen, Bleiche-Bohrung	25. Aug. bis 2. Nov.	41	3,91
60	Neuhausen, Tief- brunnen	25. Aug. bis 7. Sept.	21	3,89
64	Aach, Wasser- bohrung	27. Aug. bis 3. Nov.	24	0,98
69	Volkertshausen, Spinnerei	27. Aug. bis 18. Nov.	12	3,05

Die Aachquelle ist bis zum 4. Nov. mit 266 Proben, die Donau bei Immen- dingen bis zum 20. Okt. mit 32 Probennahmen beobachtet worden. Insgesamt sind 630 Kaliumbestimmungen durchgeführt worden.

3. 3. 2. Die Ergebnisse mit dem Duftstoff Dipenten (Eingabestelle A)

Unmittelbar nach dem Kalisalz wurden 150 l Dipenten in die Eingabestelle A eingebracht. Zur Emulgierung des Dipentens sind 15 l Alkylbenzolsulfonat verwendet worden.

Der Duftstoff Dipenten wurde erstmals in der Nacht vom 27. auf 28. August durch Geruch an der Aachquelle wahrgenommen. Der Geruch war so stark, daß er auf dem rund 50 m südlich der Aachquelle gelegenen Parkplatz an der Bundesstraße 31 deutlich bemerkt werden konnte. Obwohl Dipenten in reiner Form Zitronengeruch aufweist, war beim Austritt in der Aachquelle ein deutlicher Geruchswechsel nach Fichtennadeln nicht zu verkennen. Dieselbe Beobachtung war bei der Geschmacksempfindung zu machen. Aus diesem Grund war zunächst angenommen worden, daß es sich hierbei um den bei Liptingen eingespeisten Duftstoff Isobornylazetat handelte. Wegen des Fehlens von Detergentien und dem gleichzeitigen Auftreten von Kalium konnte jedoch Isobornylazetat ausgeschlossen werden.

Die Geschmacksprüfung erfolgte bei oder nur wenige Stunden nach der Entnahme. Das erste Auftreten des Dipentengeschmacks in der Aachquelle am 27. August zwischen 20.00 und 21.00 Uhr war gut erkennbar. Zur Unterscheidung der verschieden starken Geschmacksempfindungen sind die drei Stufen schwach, mittel und stark ausgeschieden worden (W. Käss). Diese Stufen sind rein qualitativ zu werten (s. Fig. 38). Deshalb ist zu dem Zeitpunkt, als die Geruchswahrnehmung am stärksten war, nachträglich auch der stärkste Geschmack festgestellt worden. Nach dem Auftreten des stärksten Dipentengeschmacks am 28. August zwischen 1.00 und 4.00 Uhr sank der Geschmackseindruck in der Aachquelle allmählich. In den letzten vier als positiv bezeichneten Proben am 29. August zwischen 20.00 und 23.00 Uhr war die Geschmacksempfindung nur noch äußerst gering.

Am 28. August wurde die Aach auf ihrem Lauf durch den Hegau an verschiedenen Stellen auf Dipentengeschmack untersucht. Die am weitesten unten liegende Beobachtungsstelle an der nördlichen Straßenbrücke in Rielasingen hatte um 17.00 Uhr noch deutlichen Dipentengeschmack. Es ist anzunehmen, daß auch die Aach bei ihrer Einmündung in den Bodensee noch positiven Dipentengeschmack hatte.

Andere Wasseraustritte, die auf Einspeisemittel der Eingabestelle A untersucht wurden, wiesen keinen Dipentengeschmack auf.

3. 3. 3. Die Ergebnisse mit Sulforhodamin G extra (Eingabestelle B)

Die Eingabestelle besteht aus zwei ineinandergreifenden Einsturztrichtern von etwa 5 m Tiefe, die Längsachse streicht ungefähr Ost—West. Diese Doline liegt auf der Nordflanke des Höhenrückens, der das Donautal im Norden vom Hepbach- und Aachgebiet im Süden trennt, nur rund 25 m unter seiner Kulmination und am Beginn eines von hier nach NW ziehenden Karsttales.

Bei der Eingabestelle handelt es sich um eine offene Doline, die trocken liegt. Es wurden deshalb aus einem ca. 50 m entfernten kleinen Bach vom 24. Aug. bis 2. Sept. 1969 zur Vor- bzw. Nachspülung laufend 0,5 l/s Wasser eingeleitet.

Die Eingabe von 8 kg Sulforhodamin G extra, das in 40 l Wasser gelöst war, erfolgte am 26. Aug. um 14 Uhr. Die Tracerlösung wurde durch den gleichen Schlauch eingeleitet, durch den auch vorgespült wurde. Die Lage des Schlauches wurde nicht verändert, so daß die Farbblösung dem bereits bei der Vorspülung beschickten Wasserweg folgen konnte.

Außer der Aachquelle wurden noch folgende 20 Beobachtungsstellen durch regelmäßige Probennahme auf Sulforhodamin G extra überwacht: 1, 7, 10, 15, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 56, 60, 64, 66, 67, 69 und 71. Stichprobenartig wurden darüber hinaus Proben gezogen aus den Beobachtungsstellen 1 a, 72, 73, 74, 75 und den drei Quellen der Wasserversorgung Bargaen.

Die Messung der Proben erfolgte im Laboratorium in München mit dem Turner-Fluorometer 111. Um sicherzustellen, daß die jeweils nachgewiesene Fluoreszenz tatsächlich dem Sulforhodamin G extra zuzuordnen ist, wurde von 50 Proben aus verschiedenen Meßstellen zusätzlich eine spektrale Aufnahme mit dem Perkin-Elmer-Spektrophotometer 203 durchgeführt.

Der Hauptdurchgang des Sulforhodamin G extra in der Aachquelle erfolgte in der Zeit vom 31. Aug. bis 1. Sept. 1969 (s. Fig. 39). Die charakteristischen Daten sind in der Tafel IV zusammengestellt. Der Durchgang begann 111 Stunden nach der Eingabe, das Maximum erschien nach 129 Stunden. Die leichten Anstiege in der Fluoreszenz der Aach-

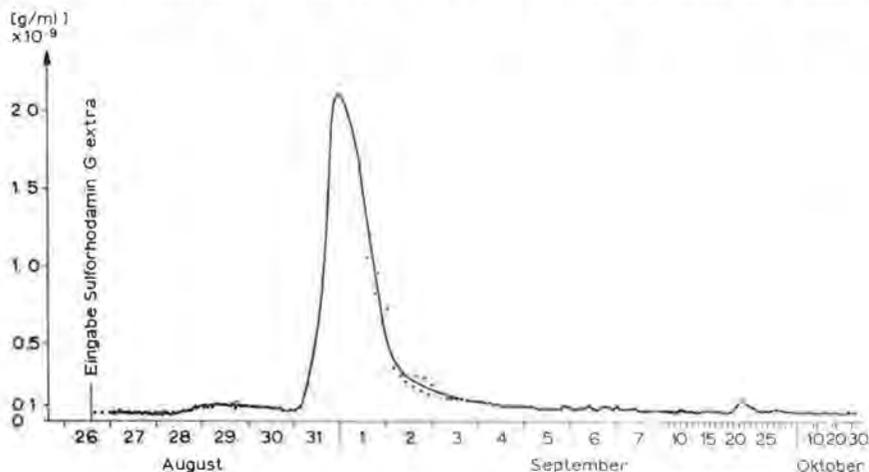


Fig. 39: Durchgangskurve des Sulforhodamin G extra in der Aachquelle.

quelle vom 28. bis 30. Aug. 1969 sowie vom 20. bis 22. Sept. 1969 gehen auf natürliche, in Wasser enthaltene fluoreszierende Stoffe zurück; sie fallen mit Hochwasserwellen in der Aachquelle zusammen. Sicher nachweisbar ist das Sulforhodamin G extra in der Aachquelle bis zum 10. Sept. 1969.

Trotz des hohen mittleren Gefälles von 25‰ zwischen der Eingabestelle und der Aachquelle ist die Abstandsgeschwindigkeit (bezogen auf das Maximum des Durchgangs) nur 89 m/h. Sie ist damit deutlich niedriger als jene Geschwindigkeiten, die durch die anderen Markierungen während der gemeinsamen Versuche für das zur Aachquelle fließende Karstwasser festgestellt wurden. So ist es zu verstehen, daß die Halbwertsbreite der Sulforhodamin-Durchgangskurve mehr als doppelt so groß ist als die Halbwertsbreiten für die anderen gelösten Tracer.

Die geringe Abstandsgeschwindigkeit und die Form der Durchgangskurve dürften damit zu erklären sein, daß die Karstgerinne, die von den Schlucklöchern im Gebiet zwischen Donau und Aach zur Aachquelle führen, nicht so gut entwickelte Wasserwege bilden, wie die von der Donau zur Aach führenden Gerinne.

Außer in der Aachquelle wurde in keiner der Beobachtungsstellen Sulforhodamin G extra nachgewiesen. Die Überwachung auf diesen Tracer erfolgte in der Aachquelle bis 13. Febr. 1970, in den Beobachtungsstellen 1, 7, 10, 12, 22, 25, 56 und 66 bis 5. Jan. 1970. In den anderen Beobachtungsstellen wurde die Probennahme zwischen Mitte September und Mitte Dezember 1969 eingestellt. Da nur rund 40‰ des eingegebenen Sulforhodamin G extra in der Aachquelle wieder austraten, muß angenommen werden, daß ein Teil des Farbstoffes entweder in „Wassertaschen“ im Karst hängengeblieben ist oder trotz des negativen Untersuchungsergebnisses an den anderen Beobachtungsstellen einen anderen Weg als zur Aachquelle genommen hat.

Durch die nachgewiesene hydrologische Verbindung zwischen der Eingabestelle B und der Aachquelle muß das bisher angenommene Einzugsgebiet der Aachquelle nach Westen zu erweitert werden.

Der im Turner-Fluorometer gemessene Untergrund gibt einen Hinweis auf die natürliche Fluoreszenz der untersuchten Wässer. Hier hebt sich das Wasser der Aachquelle deutlich heraus: Die natürliche Fluoreszenz beträgt mehr als das Doppelte derjenigen, die in den anderen Beobachtungsstellen gefunden wurde (bezogen auf die Fluoreszenz bei normaler Wasserführung).

3. 3. 4. Die Ergebnisse mit Brom (Eingabestelle C)

Zur Untersuchung der Untergrundverhältnisse im Bereich der Überquerung des Talbachs nördlich Engen ließ das Autobahnamt Baden-Württemberg mehrere Untersuchungsbohrungen niederbringen. Eine davon, und zwar jene auf dem Feldweg am Nordrand der Talaue, wurde

nicht verfüllt, sondern für den Markierungsversuch offengehalten. Die ursprüngliche Gesamttiefe betrug 24 m; durch Versturz war beim Einspeisetag lediglich eine Tiefe von 6,4 m zu loten. Beim Abteufen war unmittelbar unter der Talaue Massenkalk angetroffen worden.

Die zur Einspeisung vorgesehenen 250 kg Ammoniumbromid wurden als technisches Produkt von der Firma E. MERCK/Darmstadt bezogen. Die gute Löslichkeit des Salzes ermöglichte es, die gesamte Salzmenge in einem 1000-l-Wasserwagen in kurzer Zeit völlig aufzulösen. Die Einspeisung erfolgte am 26. August zwischen 14.05 und 14.30 Uhr, für die Vorspülung wurden 7,2, für die Nachspülung 8 cbm Wasser verwendet. Die Einspeisung erfolgte unter der Leitung von H. HÖTZL, die Probenuntersuchung führte K. BUCHTELA am Atominstitut der Österreichischen Hochschulen in Wien durch.

Bei der Neutronenaktivierungsanalyse werden durch den Einfang von Neutronen durch Atomkerne Radionuklide gebildet. Radioaktive Stoffe können qualitativ und quantitativ sehr empfindlich und rasch bestimmt werden. Ein für geohydrologische Markierung einem Wasserlauf zugesetzter inaktiver Tracer wird also erst nach der Probennahme radioaktiviert. Die Aktivierung erfolgt aber nicht nur für den Tracer, sondern auch für viele im Wasser vorliegende Begleitstoffe. In einem Gemisch von aktivierten Elementen muß der zu bestimmende aktive Indikator entweder auf Grund einer ihm spezifisch eigenen Strahlung bestimmt werden, oder die Messung kann nach der chemischen Abtrennung des aktiven Indikators von den störenden aktiven Begleitstoffen erfolgen. Als Tracer kommen Elemente in Frage, die sich aktivierungsanalytisch gut nachweisen lassen, die die chemischen, physikalischen und hygienischen Eigenschaften des Wassers nicht ändern und an den Gesteinsschichten, durch die das Wasser sickert, nicht absorbiert werden. Da für die Adsorption an den Gesteinsschichten vor allem ein Kationenaustausch verantwortlich ist, verwendet man als Tracer bevorzugt Anionen, z. B. Bromide.

Die Radioaktivität des Broms kann durch die charakteristischen Gammaspекtren nachgewiesen werden. Neben zahlreichen anderen aktiven Begleitstoffen, wie sie z. B. auch beim vergleichenden Einsatz von mehreren Markierungsstoffen vorkommen können, ist ein Nachweis durch einfache Gammaspектroskopie nicht möglich. Auch bei den anlässlich der Markierungsversuche im Donauversickerungsgebiet vorgenommenen Bestimmungen war kein direkter Nachweis möglich. Die Nachweisempfindlichkeit kann durch chemische Abtrennung verbessert werden.

Arbeitsvorschriften

1. Diese Vorschrift entspricht einer aktivierungsanalytischen Spurenbestimmung im Trinkwasser (Methode nach R. L. BLANCHARD et al. 1958). Die Probe wird etwa 12 Stunden nach der Bestrahlung aufgear-

beitet, um gleichzeitig bei der Aktivierung gebildetes radioaktives Chlor abklingen zu lassen (Halbwertszeit des Chlor-38: 37,3 Minuten).

5 ml bestrahlte Probe werden mit 1 ml 0,1 m Ammonbromidträgerlösung, 1 ml konz. Salpetersäure und 2 ml 0,1 m Silbernitratlösung versetzt. Das ausgefallene Silberbromid wird abzentrifugiert, zweimal mit destilliertem Wasser gewaschen und dann in 2 ml 20%iger Natriumthiosulfatlösung gelöst. Diese Lösung wird mit dem Gammaskpektrometer gemessen.

Bei diesem Verfahren wird Brom-82 mit einer Halbwertszeit von 35,4 Stunden bestimmt. Es können etwa 0,01 bis 0,1 Mikrogramm pro ml nachgewiesen werden.

2. Ein weiteres Verfahren erfaßt auch jenen Anteil an aktivem Brom, welcher nach der Bestrahlung durch Rückstoßprozesse nicht als Bromid (sondern z. B. als elementares Brom) vorliegt. In einem Scheidetrichter werden zu 5 ml bestrahlter Probe 1 ml 0,1 m Chlorwasser zugegeben. Das Brom wird mit Tetrachlorkohlenstoff extrahiert, das organische Lösungsmittel dreimal mit Wasser gewaschen und anschließend mit 20%iger Thiosulfatlösung ausgeschüttelt. Die Thiosulfatlösung wird gemessen. Es können etwa 0,1 Mikrogramm im Liter nachgewiesen werden.

Es kam das unter 1. beschriebene Verfahren zur Anwendung, da es für die Aufarbeitung zahlreicher Proben besser geeignet ist. In keiner der Proben konnte eine eindeutige, reproduzierbare Erhöhung des Hintergrundes festgestellt werden.

Errechnung der notwendigen Einsatzmenge: 100 kg eines eingesetzten Ammonbromides könnten in etwa 1 000 000 cbm Quellwasser nachgewiesen werden. Die bei den Versuchen auftretende Verdünnung überstieg offenbar diesen Wert.

3. 3. 5. Die Ergebnisse mit Chrom-51 (Eingabestelle D)

Normalerweise sind die Versickerungsstellen in der Fridinger Schleife nur unter besonderen Umständen zu erkennen. Daher ließ das Wasserwirtschaftsamt Rottweil am Ort der Salzeinspeisung von 1957 am südlichen Steilufer der Donau bei Flußkilometer 146,115 Vertiefungen im groben Geschiebe ausheben und bis rd. 2,5 m über den Normal-Wasserspiegel der Donau Brunnenringe einbauen (Fig. 40, 41). Dadurch war auch bei Hochwasser eine verlustlose Einspeisung in den Untergrund möglich. Durch diese Vorrichtung versickerten ständig rd. 80 l/s Donauwasser.

Das ^{51}Cr wurde als ÄdtE-Komplex in wässriger Lösung eingesetzt. Die Präparation des Tracers aus Chrompulver, das im Forschungsreaktor München durch Neutronenbestrahlung aktiviert worden war, erfolgte nach der von G. KNUTSON (1967) gegebenen Vorschrift. Die ^{51}Cr -Aktivität betrug am Einspeisungstag ca. 4 Ci.



Fig. 40: Mit Brunnenringen ausgebaute Schluckstelle in der Fridinger Donauschleife (Foto: W. Käss, 1969).

Die Eingabe des ^{51}Cr erfolgte am 26. August 1969 in der Zeit von 9.30 bis 9.47 Uhr unter der Leitung von H. BEHRENS. Dazu wurde die ^{51}Cr -Lösung (1,5 l) aus einem mit Blei abgeschirmten Kunststoff-Gefäß, das auch als strahlensicherer Transportbehälter diente, mit Hilfe einer Pumpe über eine kurze Schlauchleitung direkt in die Schwinde eingespeist. Die Eingabevorrichtung wurde noch einige Minuten mit Donauwasser nachgespült. Die Schluckleistung der Schwinde wurde zum Zeitpunkt der Eingabe auf ca. 80 l/s geschätzt.

Außer der Aachquelle wurden noch folgende Beobachtungsstellen überwacht (in Klammern die Anzahl der ausgewerteten Proben): Nr. 10 (18), Nr. 11 (13), Nr. 12 (37), Nr. 30 (—), Nr. 35 (5), Nr. 36 (7), Nr. 39 (10), Nr. 56 (14), Nr. 69 (22). Von der Aachquelle (Nr. 8) wurden 56 Proben ausgemessen.

Die Entnahme der Proben erfolgte in 5-l-Plastikkanistern, die auch als Meßbehälter dienten. Zur Messung wurden die Proben direkt auf den $4'' \cdot 8''$ -NaJ(Tl)-Kristall einer Szintillations-Meßanordnung gebracht. Die Ansprechwahrscheinlichkeit der Meßanordnung für die 325-MeV- γ -Quanten des ^{51}Cr beträgt ca. 7%. Durch das große Probenvolumen und die γ -Spektrometrie mit einem 400-Kanal-Analysator konnte eine günstige Nachweisempfindlichkeit erreicht werden. Die Messungen erfolgten im Institut für Radiohydrometrie in München.

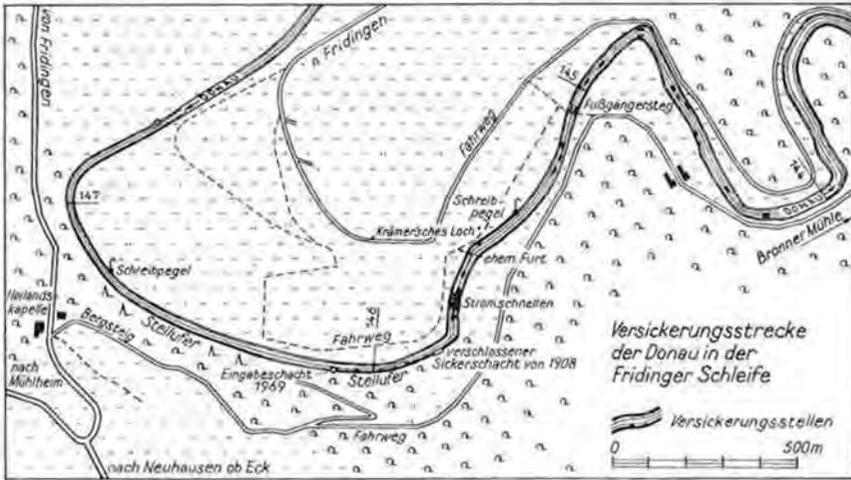


Fig. 41: Lageplan der Fridinger Donauschleife (Einspeisestelle D).

Von den überwachten Entnahmestellen wurde ^{51}Cr nur in der Aachquelle wiedergefunden. Ein erstes schwaches Auftreten von ^{51}Cr war in Proben vom 28. August 1969 festzustellen (Fig. 42). Der Hauptdurchgang begann am 29. August 1969 mittags, der Maximalwert war am Nachmittag des gleichen Tages erreicht. Bis zum 30. August 1969 mit-

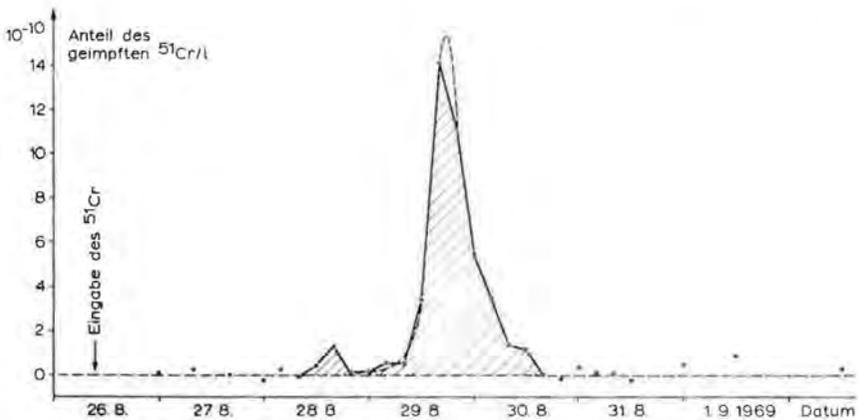


Fig. 42: Durchgangskurve des Chrom-51 in der Aachquelle.

tags war die ^{51}Cr -Konzentration in der Aachquelle wieder nahezu auf den Nullwert abgefallen. Die charakteristischen Daten des Tracerdurchgangs sind in Tafel IV enthalten.

Der Anteil des in die Schwinde bei Fridingen eingegebenen ^{51}Cr , der in der Aachquelle austrat, ergibt sich aus dem Integral der Konzentrationskurve über die Zeit und aus der Wasserführung in diesem Zeitraum. Wegen des außerordentlich raschen Konzentrationsanstieges läßt sich bei dem vierstündigen Abstand der Meßpunkte der tatsächliche Kurvenverlauf nicht genau angeben. Der niedrigst mögliche Wert des Integrals entspricht dem Meßwert-Polygon (schraffierte Fläche in Fig. 42), woraus ein Austritt des ^{51}Cr in der Aachquelle von 93% erhalten wird. Legt man jedoch durch die Meßwerte eine glatte Durchflußkurve, so erhöht sich dieser Wert: die in Fig. 42 unterbrochen gezeichnete Kurve entspricht einer nachgewiesenen ^{51}Cr -Menge in der Aachquelle von 98%. Der Fehler der berechneten Integrale beträgt ca. $\pm 5\%$ (ohne Berücksichtigung des Fehlers der Wasserführungs-Messung). Der hohe Anteil des in der Aachquelle abgeflossenen ^{51}Cr steht mit der Tatsache in Einklang, daß an keiner der anderen Entnahmestellen ^{51}Cr nachgewiesen werden konnte (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Gemessene Konzentrationswerte von ^{51}Cr in der Aachquelle

	Zeitpunkt der Probenahme	10^{-10} des eingegebenen $^{51}\text{Cr}/\text{l}$
27. August	0.00	0.15
	8.00	0.28
	16.00	0.06
28. August	0.00	— 0.24
	4.00	0.28
	8.00	— 0.02
	12.00	0.41
	16.00	1.33
	20.00	0.08
29. August	0.00	0.10
	4.00	0.59
	8.00	0.52
	12.00	3.50
	16.00	14.30
	20.00	11.30
30. August	0.00	5.55
	4.00	3.52
	8.00	1.35
	12.00	1.19
	16.00	0.06
	20.00	— 0.12
31. August	0.00	0.38
	8.00	0.12
	12.00	— 0.25
1. September	0.00	0.54
	12.00	0.92

	Zeitpunkt der Probenahme	10^{-10} des eingegebenen $^{51}\text{Cr}/\text{l}$
2. September	0.00	— 0.35
	12.00	0.32
	16.00	— 0.28
3. September	12.00	— 0.23
4. September	4.00	0
	12.00	0.63
5. September	0.00	— 0.63
	8.00	0.13
	19.00	0.15
6. September	12.00	— 0.06
8. September	0.00	0.13

Die Konzentrationswerte werden als Bruchteile des eingegebenen ^{51}Cr angegeben, da die Meßwerte auf einen aliquoten Teil des eingegebenen Indikators bezogen wurden. Die absolute Aktivität des eingegebenen ^{51}Cr ist nur ungefähr bekannt, da genaue Eichmessungen äußerst aufwendig und schwierig sind. Die genaue Kenntnis des Aktivitätswertes ist für die vorliegende Indikatoranwendung vollkommen überflüssig.

3. 3. 6. Die Ergebnisse mit Lanthan (Eingabestelle D)

Die Markierung mit inaktiven Spurenelementen und nachfolgender Aktivierungsanalyse wird als Methode der „aktivierbaren Tracer“ bezeichnet (C. BONDY 1966). Die Wahl des inaktiven Spurenelements hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab:

1. Das Spurenelement soll in dem zu untersuchenden System a priori so wenig wie möglich vorkommen,
2. das zugegebene Spurenelement muß so ausgewählt werden, daß es sich durch Aktivierung in Analysenproben des betreffenden Systems nachträglich möglichst einfach bestimmen läßt.

Im vorliegenden Fall der Donauversickerungsversuche kam hinzu, daß das Markierungsmittel und die Analysenmethode als Ergänzung zu den übrigen, bereits festgelegten Markierungsmitteln anderer an den Versuchen zur Donauversickerung beteiligter Arbeitsgruppen dienen sollte. Ferner war zu berücksichtigen, daß diese anderen zugegebenen Markierungsmittel zum Teil aus erheblichen Mengen anorganischer Salze bestanden (Kalisalz, Steinsalz, Ammoniumbromid), dadurch jedoch die Auswertung des aktivierbaren Tracers nach Reaktoraktivierung nicht gestört werden sollte.

Da wenig Zeit für Vorversuche zur Verfügung stand, entschlossen wir uns unter Berücksichtigung obiger Forderungen zu einer Markierung mit Lanthan, das mit Versene (Na-EDTA) komplexiert wurde. Am 26. August 1969 erfolgte von 9.50 bis 11.50 Uhr in der Schwinde bei Fridingen die Einspeisung von 20 kg $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ zusammen mit 30 kg Versene, gelöst in 800 l Donauwasser; die Lösung hatte einen pH von 4,5,

5 kg Versene wurden vorausgegeben, mit ebenfalls 5 kg Versene wurde nachgespült. Der Gesamtwasserabfluß an der Eingabestelle betrug rd. 80 l/s.

Die Einspeisung erfolgte unter der Leitung von H. BEHRENS, die Probenuntersuchung wurde von J. SCHMITZ und H. VOGG im Laboratorium für Isotopentechnik, Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., Karlsruhe, durchgeführt.

Für den aktivierungsanalytischen Nachweis des Lanthans wurden zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Eingabe an den betreffenden Entnahmestellen jeweils 2 l Wasserproben entnommen. Aliquote Teile wurden in einer Platinschale eingedampft, der Rückstand in Quarzröhrchen übertragen und anschließend im Karlsruher Reaktor FR 2 bei einem Neutronenfluß von ca. 10^{14} n/qcm · sec drei Tage lang bestrahlt. Die meßtechnische Auswertung des im Reaktor gebildeten La-140 (Halbwertszeit 40,2 Stunden) erfolgte sieben Tage nach der Bestrahlung durch Halbleiter- γ -Spektroskopie, wobei die 1,596 MeV- γ -Linie des La-140 zum Nachweis herangezogen wurde.

Tafel III zeigt ein solches Spektrum bis zu einer γ -Energie von zwei MeV. Bestrahlungszeit, Abklingzeit und Meßdauer wurden so gewählt, daß ein Optimum für die Lanthan-Analyse erreicht wurde. Die Nachweisgrenze für das Lanthan liegt unter den gewählten Bedingungen in der Größenordnung Nanogramm pro Liter (P. KRUGER & J. K. CHANNEL, 1970, G. SCHMIDT, 1968). Im vorliegenden Fall der Markierung von Donauwasser muß diese Grenze jedoch auf Grund des im Wasser vorhandenen Urans, das bei der Aktivierung durch Kernspaltung ebenfalls La-140 bildet, auf ca. 0,3 μ g/l heraufgesetzt werden.

Untersucht wurden Wasserproben der Aachquelle sowie der Entnahmestellen Eigeltingen (12) und Beuren (10).

Insgesamt wurden für die Aachquelle drei Versuchsreihen durchgeführt: In einer ersten Serie wurden filtrierte Wasserproben, und zwar je eine pro Tag, auf Lanthan analysiert; in einer zweiten Serie wurde nichtfiltriertes Wasser, ebenfalls je eine Probe pro Tag, untersucht; in einer dritten Serie wurde das in der zweiten Versuchsreihe am 28. und 29. August gefundene Lanthanmaximum in seiner Feinstruktur näher ermittelt, indem die in diesem Zeitraum im Abstand von vier Stunden gezogenen Wasserproben alle analysiert wurden.

Auf Grund der Ergebnisse für die Aachquelle wurden für die Entnahmestellen 12 und 10 jeweils für den Zeitraum des erwarteten Lanthandurchtritts Tagesanalysen nichtfiltrierter Wässer durchgeführt.

Ein erstes, sehr wichtiges Versuchsergebnis bestand darin, daß nicht alle gefundenen La-140-Werte einer Halbwertszeit von 40,2 Stunden zugeordnet werden konnten, sondern teilweise mit einer sehr viel längeren Halbwertszeit abfielen. Durch genaue Analyse der Abfallskurven zeigte sich, daß neben dem durch die Lanthanmarkierung vor-

handenen bzw. im Reaktor gebildeten La-140 noch weiteres La-140 auftrat, das durch Kernspaltung aus Uranteilen des Wassers entstanden war. Dieses Spaltlanthan bildet sich als Tochternuklid über Barium-140 und zerfällt nach Erreichen des radioaktiven Gleichgewichtes (das ist praktisch eine Woche nach Bestrahlung) mit der Halbwertszeit der Muttersubstanz Ba-140, also 12,8 Tagen. Unter diesen, etwas erschwereten Analysenbedingungen hatte die Auswertung der einzelnen Versuchsserien zu erfolgen.

Aus der Untersuchung der **filtrierten** Wasserproben aus der Aachquelle ergab sich durch Kontrolle der Halbwertszeit eindeutig, daß das gefundene La-140 in diesem Fall ausschließlich aus Uran stammt. Wie die entsprechende Kurve c der Fig. 43 zeigt, werden im zeitlichen Verlauf annähernd konstante Werte erhalten. Daraus berechnet sich ein mittlerer Urangehalt von ca. 0,6 µg Uran pro Liter Wasser. Wasserlösliches Markierungslanthan konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Analyse der **nichtfiltrierten** Tagesproben der Aachquelle ergab (s. Fig. 43) La-140-Werte, die einerseits dem Markierungslanthan (Kurve d), andererseits dem Urangehalt (Kurve e) zuzuordnen waren (die Kurven d und e wurden durch Halbwertszeitkurvenanalysen der Summenwerte erhalten).

Der Fig. 43 ist zu entnehmen, daß das Markierungslanthan eindeutig nachgewiesen werden kann und in seinem Maximalwert am 28. August mindestens um den Faktor 5 über dem Blindwert lag. Interessant ist die Tatsache, daß das Lanthan in mehreren Perioden, einer ersten am 28./29. August (rel. Konz. 725), einer zweiten am 2. September (rel. Konz. 350) und einer dritten am 4. September (rel. Konz. 180) auftrat.

Weiteres Markierungslanthan zeigte sich am 18. September, am 28. September und am 3. Oktober. Dies sind jedoch nur Einzelwerte, da tägliche Wasserproben in diesem Zeitraum nicht zur Verfügung standen. Eine genaue Peaklage konnte daher in diesen Fällen nicht bestimmt werden.

Unterschiedliche Adsorptionseinflüsse sowie Wechselwirkungen zwischen dem La-EDTA-Komplex und den im Überschuß vorhandenen Ca-Ionen des Wassers und den durchflossenen Bodenschichten dürften für die Tatsache des periodisch auftretenden Lanthans eine wichtige Rolle spielen. Das periodische Abklingen des Markierungstracers ist eine auch in anderen Arbeiten viel diskutierte Tatsache, die bei einem so komplexen Vielparametersystem, wie es hier vorliegt, nicht eindeutig erklärbar ist (A. LALLEMAND, 1969, T. CLESS-BERNERT, 1970, J. GUIZERIX, 1970). Die ermittelten La-140-Werte aus Uran stimmen gut mit den Resultaten der Versuchsserie 1 überein und erfahren dadurch eine direkte Bestätigung. Der Uranwert für die Zeit nach dem 3. Oktober erreicht wieder einen Normalwert von ca. 0,5 µg.

Aus der Kenntnis der Versuchsserie 2 wurde schließlich für den am 28./29. August auftretenden Haupt-Lanthan-Peak eine zeitlich differen-

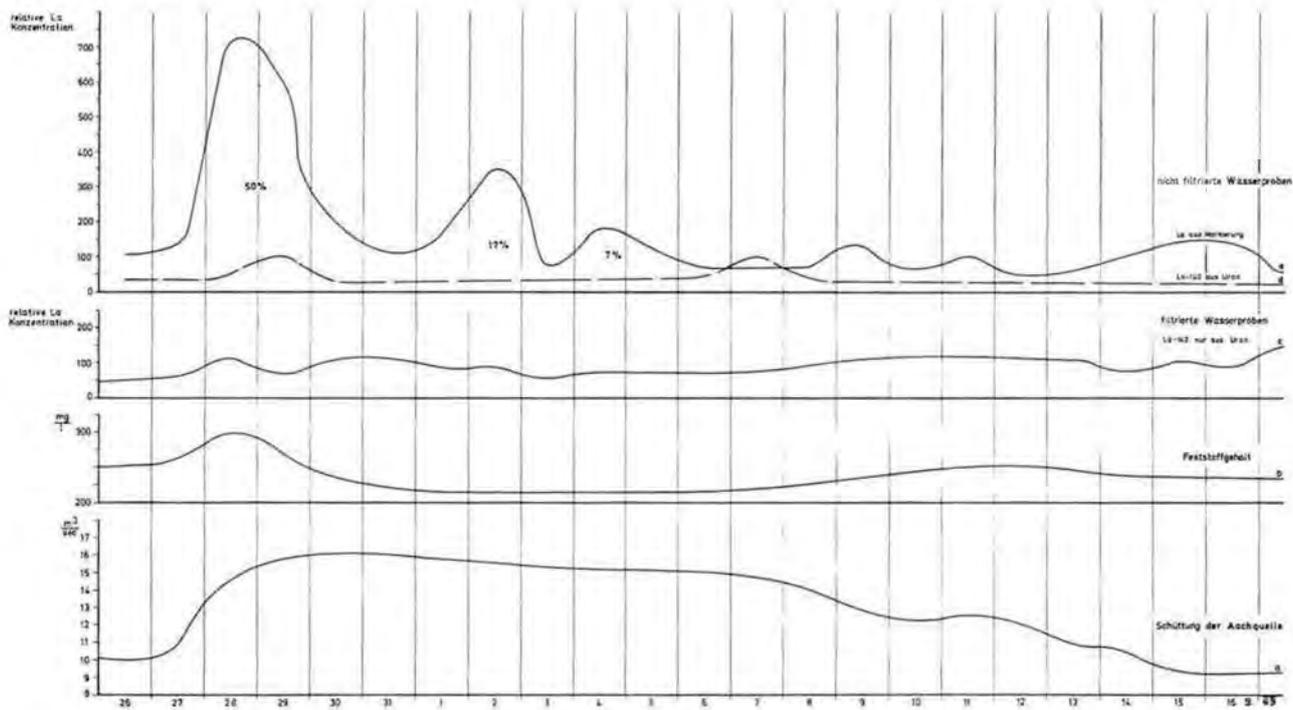


Fig. 43: Übersicht über die Lanthan-Gangkurven der filtrierte und nicht-filtrierte Wasserproben in der Achquelle.

zierte Auswertung vorgenommen, indem alle zwischen dem 28. und 29. August im Abstand von vier Stunden gezogenen Aachwasserproben analysiert wurden. In diesem Fall wurden jetzt Absolutmengen bestimmt, um den Prozentsatz des in dieser Zeit wieder aufgetretenen Markierungslanthans angeben zu können. Diese Ergebnisse sind in Fig. 44 dargestellt, wobei darauf hinzuweisen ist, daß es sich jeweils um bereits Uran-korrigierte Werte handelt.

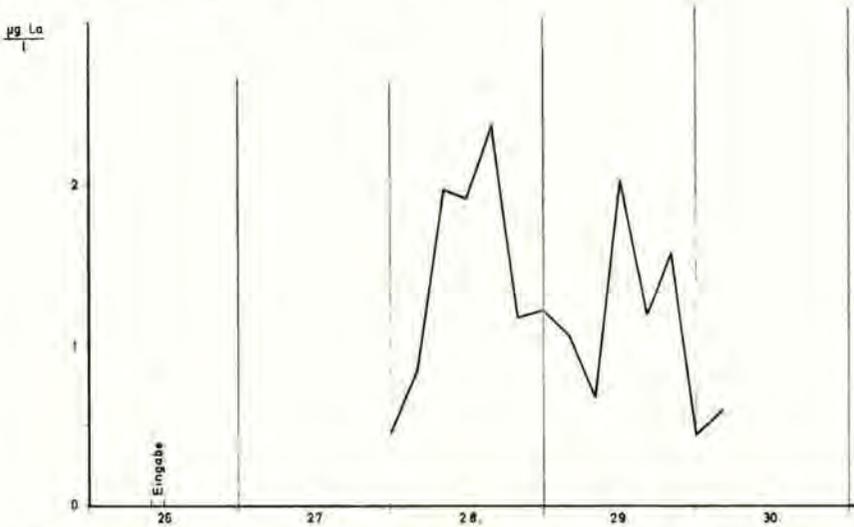


Fig. 44: Lanthan-Gangkurve der nichtfiltrierten Wasserproben in der Aachquelle.

Die gefundene Feinstruktur zeigt, daß offensichtlich innerhalb der ersten Durchtrittsperiode des Lanthans wiederum zwei Maxima existieren, eines am 28. August, 16.00 Uhr, ein zweites am 29. August, 12.00 Uhr. Der Integralwert über diese Konzentrationskurve multipliziert mit dem Integralwert der Aachschüttung ergibt, daß 50% des eingesetzten Markierungslanthans in der ersten Periode wiederaufgetreten ist. Die zweite Periode (2. September), ersichtlich in der Versuchsserie zwei, ist dann analog mit 17% des Eingabelanthans, die dritte Periode (4. September) mit 7% des Eingabelanthans zu bewerten. Bei einer Wegstrecke von 18,3 km zwischen Eingabestelle und Aachquelle errechnet sich für 50% des eingegebenen Lanthans eine Laufgeschwindigkeit von ca. 300 m/h. Die Genauigkeit der einzelnen Feinstrukturpunkte liegt bei $\pm 5\%$.

Das nichtfiltrierte Wasser der **Oberen Kressenlochquelle** (12) bei Eigeltingen wurde im Zeitraum vom 26. August bis 1. September auf Markierungslanthan untersucht. Hierbei zeigte sich nach dem Normal-

wert von rd. $0,3 \mu\text{g La/l}$ am 26. August ein erster Anstieg des Lanthans am 27. August, zu Mittag, auf den siebenfachen Nullwert und am 29. August, zu Mittag, ein Anstieg auf den zwölffachen Nullwert (s. Fig. 45). Der erste Durchgang des Markierungslanthans entspricht einer bisher an keiner anderen Stelle beobachteten mittleren Durchflußgeschwindigkeit von 620 m/h, während der zweite Peak eine Durchflußgeschwindigkeit von ca. 200 m/h ergibt, die im Einklang steht mit den bei der Aachquelle gefundenen Werten.

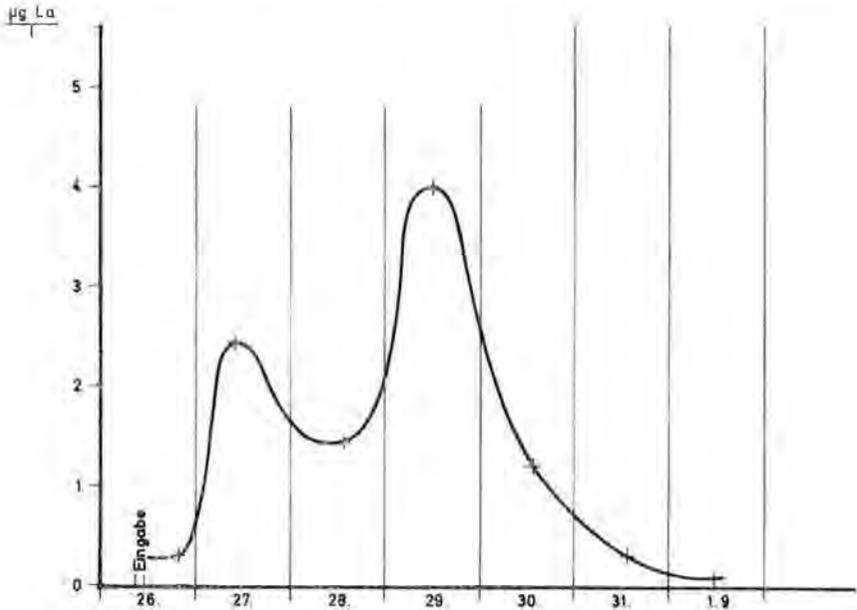


Fig. 45: Lanthan-Gangkurve der nichtfiltrierten Wasserproben der Oberen Kressenlochquelle (Nr. 12) bei Eigeltingen.

Die Lanthankonzentration nimmt dann wieder am 31. August und 1. September bis zum Normalwert (aus Uran) ab. In die Mengenbilanz des Markierungslanthans gehen die hier mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ analysierten Lanthankonzentrationen wegen der geringen Quellschüttung (ca. 20 l/s) nicht ein. Es handelt sich hier eindeutig auf Grund von Halbwertszeitanalysen um das bei Fridingen eingegebene Markierungslanthan.

Das Wasser des Tiefbrunnens **Beuren** (10) wurde für den Zeitraum vom 2. bis 4. September analysiert; erwartungsgemäß wurde hier kein Markierungslanthan gefunden. Der Uran-Nullwert dieses Wassers liegt bei $0,4 \mu\text{g U/l}$.

Durch die vorliegende Untersuchung konnte gezeigt werden, daß die Methode der „aktivierbaren Tracer“ für hydrogeologische Untersuchungen gut geeignet ist. Obwohl festgestellt wurde, daß das komplexiert eingegebene Lanthan nicht in löslicher Form, sondern an Schwebstoffe adsorbiert vorliegt, gestattet es doch, sogar über größere Entfernungen hinweg repräsentative Aussagen über das Verweilzeitverhalten unterirdischer Wässer zu machen. Die Methode wird immer dann besonders vorteilhaft angewandt werden können, wenn der Einsatz offener radioaktiver Stoffe oder größerer Mengen anorganischer Salze und organischer Reagenzien zu Markierungszwecken aus Strahlenschutz- oder gesundheitlichen Gründen (Trinkwasserentnahme) nicht erfolgen kann.

3. 3. 7. Die Ergebnisse mit Detergentien (Eingabestelle E)

Auf der Ebene östlich Liptingen lagern tertiäre Tone flach dem Weißen Jura auf. Für die Rötung von Ziegeleiprodukten wurden bis vor wenigen Jahren diese Tone abgebaut. Zur Entwässerung der Tongrube sind mehrere gemauerte Schächte angelegt worden, die miteinander durch Stollen verbunden sind. Der südlichste Schacht hat eine Tiefe von rd. 3,5 m. Er entwässert die Tongrube in die anstehenden Weißjurakalke. Für die Einspeisung von Markierungsstoffen war dieser Schacht besonders gut geeignet, da er zur Versuchszeit ein ständiges Gerinne von rd. 0,5 l/s aufwies. Eine Vorspülung war wegen der ständigen Versickerung, die auch in Trockenzeiten stattfindet, nicht notwendig.

Die Möglichkeit, unterirdische Wasserwege durch synthetische Schaumstoffe zu markieren, wurde zuerst von W. A. SCHNITZER (1965) experimentell erprobt. Bei den hier zu diskutierenden vergleichenden Markierungsversuchen wurden zwei Typen von Detergentien eingesetzt, einmal ein „hartes“ Detergens Marlon-374 der Chemischen Werke Hüls, ferner das 30% „weiche“, d. h. biologische abbaufähige Detergens enthaltene Marlon AFR der gleichen Firma.

Die Gesamtmenge an eingesetzten Detergentien (200 kg harte und 62 kg weiche) war so bemessen worden, daß eine übermäßige bzw. störende Schaumbildung an den mutmaßlichen Austrittsstellen des markierten Grundwassers nicht zu erwarten war. Ein spezifischer Zusatz von schaumstabilisierenden Stoffen, wie von W. A. SCHNITZER (1967) erwähnt, erfolgte in diesem Versuch nicht, da neben den Detergentien auch noch ein Duftstoff (Isobornylacetat) zugegeben und dieser Stoff mit ÄdtE in Emulsion gebracht wurde. Das in Konsistenz einer butterartigen Paste angelieferte harte Detergens Marlon-384 (s. Fig. 46) wurde etwa 30 Stunden vor dem Eingabetermin in einem Tankfahrzeug mit rd. 1700 l Leitungswasser aus dem Ortsnetz Liptingen unter Verwendung eines kräftigen Elektrorrührers so in Lösung gebracht, daß eine



Fig. 46: *Abstechen der harten Detergentien aus der Verpackung (Foto: W. Käss, 1969).*

Schaumbildung im Rahmen des Möglichen vermieden wurde. Die Eingabe dieses Markierungsmittels erfolgte dann am 26. August 1969 von 9.35 bis 9.55 Uhr mittels eines Feuerwehrschauches. Da die Entleerung des Tanks mit einem zusätzlichen Druckluftpolster erfolgen konnte, war die Eingabe leicht und schnell möglich. Anschließend wurden die weichen Detergentien ohne jeden Wasserzusatz in sirupartiger Konsistenz von 10.10 bis 10.25 Uhr in den Schacht abgelassen. Durch die Fallhöhe von über 3 m bildete sich im Schacht ein Schaum, der jedoch den Schachtrand nicht überstieg, also die Eingabearbeiten nicht störte. Es folgte an gleicher Stelle zusätzlich zu den Detergentien die Eingabe eines Duftstoffkonzentrats (Isobornylacetat).

Ab 10.00 bis 11.40 Uhr erfolgte durch zwei im Pendelbetrieb eingesetzte Tankfahrzeuge eine Nachspülung von insgesamt 17 cbm Wasser.

Die Detergentien wurden mit zwei Methoden bestimmt, einmal von W. A. SCHNITZER mit der von ihm angegebenen halbquantitativen „Schaumhöhenbestimmung nach dem Schüttelverfahren“, zum anderen von R. GEISLER kolorimetrisch als quantitativ-photometrische Bestimmung mit der Methylenblaumethode (J. LONGWELL & W. D. MANIECE, 1955).

3. 3. 7. 1. Die Bestimmung der Detergentien mittels Kolorimetrie

Bei Markierungsversuchen besteht die Notwendigkeit, auch geringe Gehalte an Detergentien quantitativ zuverlässig zu erfassen. Bei MAS-Gehalten (MAS = Methylenblauaktive Substanz) unter 0,05 mg/l muß der Analysengang sehr sorgfältig bzw. stets nach dem gleichen Modus durchgeführt werden. Zunächst gering erscheinende Abweichungen, z. B. beim Ausschütteln der gefärbten Verbindung zwischen Methylenblau und dem Anion des Detergens, können das Ergebnis wesentlich beeinflussen. Nach eingehender vergleichender Prüfung verschiedener in der Literatur angegebenen Analysenmodifikationen wurde der Analysengang nach H 23 der „Deutschen Einheitsverfahren zur Wasseruntersuchung“ — identisch mit der Vorschrift der Fa. Merck/Darmstadt, Repro 8163 — angewandt.

Folgende Faktoren sind wichtig, um auch in sehr niedrigen Konzentrationsbereichen (0,1 mg/l MAS) zufriedenstellende Analysenwerte zu erhalten:

Sorgfältig mit zehnprozentiger alkoholischer Salzsäure vorgereinigte Glasgefäße,
gleichmäßiges, aber nicht zu heftiges Ausschütteln des Farbkomplexes (H. E. KLOTTER, 1957),
genaue Abtrennung der jeweiligen Chloroformphase mit dem Farbkomplex vom Wasser, und,
wenn eine Analyse sofort nach der Probenentnahme nicht möglich ist, Konservierung der Probe mit etwa 10 mg/l HgCl_2 , wie von W. K. FISCHER (1962) angegeben.

Im Sommer 1969 war der normale Detergentiengehalt des Donauwassers mehrmals überprüft worden. Meist lagen diese Grundlastwerte zwischen 0,0 und 0,1 mg/l MAS. In der Aachquelle (Nr. 8) lagen die Werte stets bei 0,00 mg/l MAS. Auch während der Zeit der Versuchsdurchführung, d. h. von Ende August 1969 bis Dezember 1969, entnommene Kontrollproben aus der Donau in Immendingen (Nr. 2) zeigten das normal übliche Bild. Störungen des Markierungsversuches durch Fremdzufuhr von Detergentien aus Abwassereinleitungen sind also auszuschließen.

Erste Spuren von MAS traten am späten Abend des 28. August 1969, also 57 Stunden nach der Eingabe, in der Aachquelle (Nr. 8) auf (s. Fig. 47). Ein kräftiges Maximum fand sich am 29. August um 10 Uhr, d. h. nach 72 Stunden. Bei dem aufgetretenen Höchstwert von 0,235 mg/l MAS war eine deutliche, aber keinesfalls störend zu bewertende Schaumbildung zu beobachten. Der Hauptdurchgang war am Abend des 29. August abgeschlossen. Ein kleines, neues Maximum trat kurz nach dem Einsetzen von Regenfällen im Markierungsgebiet um den 5./6. September herum auf, ab 7. September waren bis zum Ende der Beobachtungszeit, d. h. bis zum 24. November 1969, keine Detergentien mehr festzustellen.

Die Durchgangskurve der Detergentien bzw. von MAS steht in Berücksichtigung der jeweiligen Entfernungen von der Aachquelle in ausgezeichneter Übereinstimmung mit dem Durchgang des nördlich von Liptingen bei Eingabestelle D eingespeisten Chrom-51.

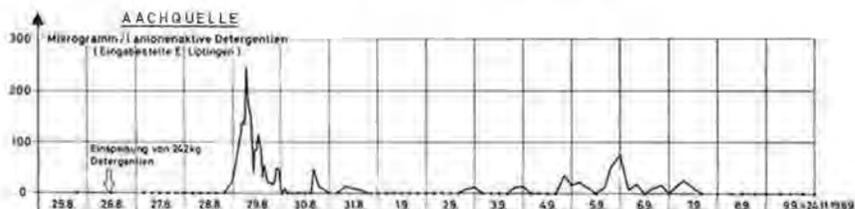


Fig. 47: Gangkurve der mit der Methylenblau-Methode ermittelten Detergentien in der Aachquelle.

In den neben der Aachquelle (Nr. 8) noch beobachteten Quellaustritten bzw. Brunnen Nr. 11, 12, 33 und 39 konnten keine MAS, auch nicht in Spuren, nachgewiesen werden.

Dagegen wurde in Nr. 10 (= Beuren a. d. Aach) am 3. September und 6. September 1969, jeweils um 20 Uhr, 0,015 mg/L WAS ermittelt. Ein weiterer Nachweis erfolgte in Nr. 56 (Welschingen), und zwar am 6. September um 17.30 Uhr und 13. September 1969 um 10.30 Uhr, mit je 0,025 mg/L WAS.

Berechnet man die „Wiederausbringungsrate“ in der Aachquelle, so sind während des maximalen Durchganges am 29. August 106 kg MAS ausgetreten, weitere rd. 12 kg an den folgenden zwei Tagen. Zwischen dem 2. September und 7. September 1969 wurden rd. 90 kg MAS nachgewiesen, insgesamt also in der Aachquelle $106 + 12 + 90 = 208$ kg MAS. Dem steht eine Eingabemenge von 262 kg MAS gegenüber, d. h., 79,5% der eingegebenen Menge konnten analytisch nachgewiesen werden, wobei die geringen Detergentienaustritte außerhalb der Aach nicht mitberechnet wurden. Der angegebene Prozentsatz, erzielt mit der Methylenblaukolorimetrie, ist sehr hoch und wesentlich größer bzw. besser als für die Schüttelmethode genannt (W. A. SCHNITZER 1967).

Da die Hälfte der Detergentien aus „weichen“ abbaufähigen Alkylbenzolsulfonaten bestand, mußte mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß diese Stoffe bei ihrem unterirdischen Wanderweg z. T. bereits abgebaut und deshalb nicht mehr in vollem Ausmaß an den Austrittsstellen erfaßt werden. Um einen etwaigen Abbau der weichen Detergentien zu prüfen, wurden entsprechende Laborversuche mit Wasser aus der Aachquelle durchgeführt.

Wie der Kurvenverlauf in der Fig. 48 ausweist, trat bei 11–12° C in den ersten fünf Tagen nach Beigabe des weichen Detergens zu dem an organischen Stoffen und Bakterien relativ armen Aachwasser (Kurve A)

kein Abbau ein. Erst nach dem fünften Tag, d. h. wahrscheinlich nach einer Adaption der Bakterienbiocönose an das spezifische Milieu, war ein deutlicher Abbau an MAS erkennbar. Ein Parallelversuch mit einem bakterienreichen Abwasser aus einer biologischen Kläranlage (Belebtschlamm) zeigte deutlich gemäß der Kurve, wie entscheidend der Abbau des weichen Detergens vom Milieu abhängt: Der Gehalt an MAS sank bereits kurz nach Versuchsbeginn stark ab, nach drei Tagen war keine MAS mehr vorhanden.

Nach diesen Versuchsergebnissen kann ausgeschlossen werden, daß in den drei Tagen zwischen der Eingabe des Markierungsstoffes in Lipptingen und dem Austritt in der Aachquelle Abbauvorgänge von Belang im Untergrund abgelaufen sind.

Anders ist die Situation beim zweiten Auftreten von MAS am 5./6. September zu bewerten. In diesen neun Tagen muß mit Sicherheit mit einem Abbau der weichen Detergentien gerechnet werden.

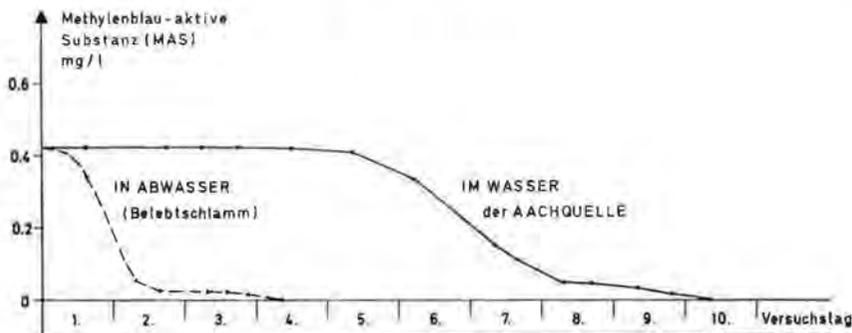


Fig. 48: Abbaukurve der weichen Detergentien im Aachwasser und in einem bakterienreichen Abwasser aus einer biologischen Kläranlage.

Die gleichfalls im Versuch geprüften harten Detergentien (Marlon-374) blieben während der Kontrollversuche unverändert.

Bekanntlich ist durch gesetzgeberische Maßnahmen in der BRD seit 1964 die Verwendung harter Detergentien in Waschmitteln u. ä. nicht mehr zulässig. Wenn auch der gelegentliche Einsatz harter Detergentien für wissenschaftliche Zwecke, wie es Markierungsversuche darstellen, durchaus wasserwirtschaftlich zu vertreten wäre, so ist es doch schwer und in naher Zukunft wohl unmöglich, derartige Markierungsstoffe noch zu erhalten. Es muß also damit gerechnet werden, allein weiche Detergentien für Markierungsversuche zur Verfügung zu haben.

Wie die Erfahrungen aus dem Versuchsgebiet Donauversinkung und die Laborbefunde zeigten, können zur Markierung weiche Detergentien mit gutem Erfolg eingesetzt werden, unter der Voraussetzung, daß die

zu markierenden Wässer nicht stärker organisch belastet sind und die Laufzeit unter sechs Tagen liegt. Unter solchen Voraussetzungen, wie sie meist gegeben sind, ist auch eine Berechnung der Wiederausbringungsrate durchführbar. Liegt die Laufzeit über fünf Tage, ist in jedem Fall mit einem Abbau der weichen Detergentien zu rechnen, und dann sind nur noch qualitative Aussagen möglich.

3. 3. 7. 2. Die Bestimmung der Detergentien mittels der Schaumhöhenmethode

Die eingebrachten harten und weichen Detergentien zeichnen sich durch ein ausgeprägtes Schaumvermögen aus. Auf diesem Effekt beruht der Nachweis mit Hilfe der Schaumhöhenmethode. Bei stehendem oder laminar fließendem Wasser geben weder harte Detergentien noch Alkylbenzolsulfonate (weiche Detergentien) irgendeine Schaumbildung. Erst bei turbulent fließendem Wasser oder künstlich erzeugter Turbulenz entwickelt sich Schaum, der jedoch in der sich bildenden Menge stark von der Wasserhärte abhängig ist. Bei 20° C liegen die Verhältniszahlen der Schaumhöhe bei 1 g waschaktiver Substanz pro Liter wie folgt:

Vollentsalztes Wasser	Wasserhärten in °dH					
	5	10	15	20	30	40
28	22,5	11	9,5	7	6	5,5

Bei harten Wässern ist also von vornherein die zu erwartende Schaumbildung und Schaumhöhe wesentlich geringer als bei weichen Wässern. Aus der Kenntnis dieser Verhältnisse läßt sich nunmehr der Anteil an Detergentien in Wässern annähernd quantitativ mit Hilfe von Vergleichslösungen bestimmen.

Normalerweise erfolgt der Nachweis in Schüttelkolben von 500 ml Fassungsvermögen und mit möglichst engem Hals. Die zu prüfende Lösung wird im Schüttelkolben kräftig mit Luft durchbewegt, wobei die Menge der in den 500 ml Probemenge enthaltenen Detergentien mechanisch extrahiert wird. Diese relativ einfache und unkomplizierte Methode gestattet es, Detergentien bis zu einem Verdünnungsgrad von mehr als 1 : 8 Mill. mit einiger Übung noch sicher nachzuweisen. Bei allen bisher durchgeführten Untersuchungen ist es immer wieder erstaunlich, wie empfindlich dieser einfache Nachweis ist, der nach unseren bisherigen Erfahrungen alle chemisch exakteren Nachweismethoden an Empfindlichkeit immer noch übertrifft. Bei besonders geringem Detergentiengehalt schüttelt man zweckmäßigerweise in einem 1-Liter-Kolben. Qualitativ liegt die Nachweisbarkeitsgrenze größenordnungsmäßig bei 1 : 10⁻⁸, da in den austretenden Wässern der sich bildende Schaum in Stillwasserwinkeln selektiv anreichert. Aufgrund der bis-

herigen Erfahrungen ist auch eine Verwechslung mit anderen schäumenden Substanzen (z. B. Eiweiß) praktisch ausgeschlossen.

Alle Werte, die in den Kurven dargestellt werden, beziehen sich auf den Nullwert der Aachquelle. Mit anderen Worten, die relative Schaumhöhe 0 ist an der Aachquelle die Basis für alle gemessenen Schaumhöhen. Der 0-Wert der Aachquelle dürfte bei einem Verdünnungsgrad von 1 : 15 Mill. liegen.

Auf die Markierung bei der Einspeisungsstelle E haben einwandfrei angesprochen: die Aachquelle, ferner 11 (Eigeltingen, Untere Kressenlochquelle), Eigeltingen 12 (Obere Kressenlochquelle) und Eigeltingen 13. Nicht mehr angesprochen hat der Entnahmepunkt Eigeltingen Nr. 39 (Salzbahnquelle). Fig. 49 zeigt den Durchgang der Detergentien mit ihrer relativen Schaumhöhe in der Aachquelle (Entnahmestelle 8).

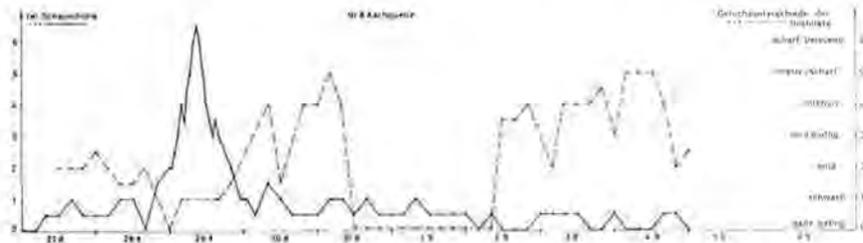


Fig. 49: Gangkurve der durch die Schaumhöhenbestimmung ermittelten Detergentien in der Aachquelle und Gangkurve der durch die Geruchsbestimmungen ermittelten Unterschiede im Aachquellenwasser.

Das erste Auftreten von Detergentien in der Aachquelle war am 27. August 1969 um 8 Uhr zu verzeichnen. Das Maximum des Detergentiendurchgangs lag nach der Bestimmung der Schaumhöhenmethode am 29. August 1969 um 9 Uhr. Die aufgegebenen Detergentien ließen sich einwandfrei bis zum 4. September um 20 Uhr nachweisen. Die Proben vom 5., 6. und 7. September zeigten keinen meßbaren Gehalt mehr an Tensiden. Auffällig bei der Kurve sind die Detergentiengehalte vom 27. und 28. August, wo die Kurve noch einmal fast auf Null absinkt. Man könnte in diesem Fall daran denken, daß der Geruchsstoff Dipenten, der mit 15 Liter Schaumstoff emulgiert wurde, diese Werte hervorruft. Jedoch erscheinen die in A aufgegebenen Mengen Schaumstoff zu gering, um diesen Effekt hervorrufen zu können. Im übrigen waren auch am 28. August abends in Stillwasserwinkeln der Aach einwandfreie Schaumblasen von Detergentien nachzuweisen, die nur von größeren Mengen eingebrachter Detergentien stammen dürften, so daß aller Wahrscheinlichkeit nach die Vorläufer der in E aufgegebenen Detergentien tatsächlich schon am 27. August um 8 Uhr austraten. Da die Auswertung der Proben aus zeitlichen Gründen erst später in Er-

langen vorgenommen werden konnte, läßt sich die Menge des ausgetretenen Tracers nicht mehr einwandfrei nachweisen, da während dieser Zeit ein größerer Teil der weichen Detergentien abgebaut worden sein dürfte. Unter Berücksichtigung, daß auch die Entnahmepunkte Eigeltingen 11, 12 und 13 (Fig. 50) wenn nur schwach, aber doch ganz einwandfrei auf die Markierung angesprochen haben, dürfte der gefundene Wiederaustritt des Tracers höher liegen, als wenn man nur die Aachquelle allein betrachtet.

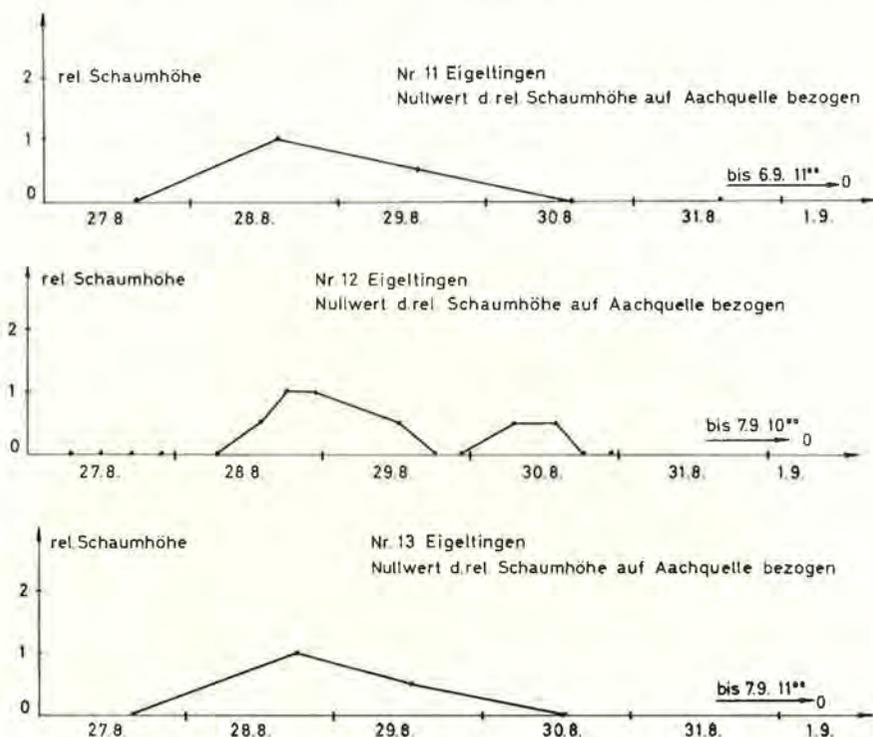


Fig. 50: Durchgangskurven der durch die Schaumhöhenbestimmung ermittelten Detergentien in der Unteren Kressenlochquelle (Nr. 11), in der Oberen Kressenlochquelle (Nr. 12) und in der Wasserfassung bei Eigeltingen (Nr. 13).

Die Maxima in den Proben von Eigeltingen 11 lagen am 28. August bei 18 Uhr, bei Eigeltingen 12 gegen 18 bis 24 Uhr am 28. August und nochmals am 30. August zwischen 7 und 13.50 Uhr; bei Eigeltingen 13 war der Hauptdurchgang am 28. August zwischen 18 und 22 Uhr (vgl. Fig. 50). Alle anderen untersuchten Proben lagen unter dem Nullwert der Aachquelle.

Die Entnahmestelle 2 (Immendingen an der Donau) zeigt eine sehr stark schwankende Detergentienlast, die von relativen Schaumhöhen von 1 bis 4 im Zeitraum vom 23. August bis 7. September schwankt. Die Ursache hierfür kann sehr mannigfaltiger Natur sein und läßt sich ohne spezielle Untersuchungen kaum finden (s. Fig. 51).

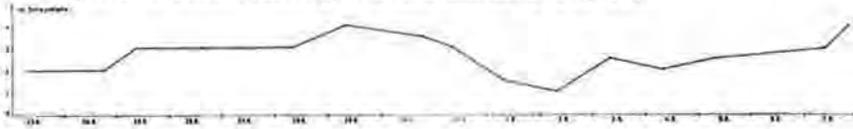


Fig. 51: Grundlast der durch die Schaumhöhenbestimmung ermittelten Detergentien in der Donau bei Immendingen (Beobachtungsstelle Nr. 2). Nullwert der relativen Schaumhöhe auf Aachquelle bezogen.

3. 3. 8. Die Ergebnisse mit dem Duftstoff Isobornylacetat (Eingabestelle E)

Von der großen Anzahl intensiv riechender und gesundheitsunschädlicher Geruchsstoffe bleiben beim Überprüfen in bezug auf Wasserbeständigkeit, Luftbeständigkeit, Emulgierbarkeit bzw. Löslichkeit in Wasser, genügend niedrigen Dampfdruck, günstigen Verteilungskoeffizienten zwischen Luft und Wasser, keine oder nur sehr geringe Absorbierbarkeit an Mineralien, keine störende Salzbildung oder Ausfällung durch natürliche im Wasser gelöste Stoffe sowie bezüglich der toxilogischen Beurteilung derzeit 3 Verbindungen übrig: 1. Isobornylacetat (Fichtennadelgeruch) mit einer Wahrnehmungsschwelle von 1 : 50 Mill.; 2. Dipenten (terpentin- bis zitronenartiger Geruch) mit einer Wahrnehmungsschwelle von 1 : 10 Mill. und 3. Isoamylsalicylat (Orchideenblütengeruch) mit einer Wahrnehmungsschwelle von 1 : 100 Mill. Diese Geruchsstoffe wurden auf der nördlichen und südlichen Frankenalb bei Pegnitz und im Altmühltal erstmals erfolgreich eingesetzt (W. A. SCHNITZER & W. WAGNER 1967, 1969). Da die Geruchsstoffe wasserunlöslich sind, müssen sie vorher emulgiert werden. Nach zahlreichen Versuchen hat sich hierfür immer wieder Alkylbenzolsulfonat (weiche Detergentien) am besten bewährt. Die Emulgierbarkeit ist bei Isobornylacetat hervorragend und bei Dipenten gut. Bisher wurden Geruchsstoffe bei etwa 10 Markierungen erfolgreich eingesetzt. Aufgrund der noch relativ geringen Anzahl von Markierungen, die meist dazu dienen sollten, gleichzeitig aufgegebene größere Mengen an Detergentien wiederum mitzumarkieren, war von vornherein zu erwarten, daß bei dem Großversuch im Bereich der Donauversickerung durchaus bisher noch nicht bekannte Effekte und neue Probleme auftauchen können. Insbesondere gilt das für die aufzugebenden Mengen, die vorsichtshalber relativ gering gehalten wurden, da noch zuwenig Erfahrungen bezüglich eines Großversuches bestanden.

Am 26. August 1969 wurde die Eingabestelle E mit 70 kg Isobornylacetat (Fichtennadelgeruch) in der Zeit von 10.40 bis 11.25 Uhr be-

schickt. Vorspülung und Nachspülung war insgesamt die gleiche wie bei Aufgabe der harten und weichen Detergentien.

Für die Auswertung der Geruchsstoffe wurden außer dem Aachtopf (8) noch folgende Probeentnahmestellen untersucht: 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 24, 25, 26, 33, 39, 56, 60 und 69. Die Probegutmengen waren jeweils 100 ml.

Die Auswertung erfolgte rd. 3 Wochen nach der Einspeisung in Erlangen nach noch näher auszuführenden Methoden.

Wie bereits beschrieben (3.3.2.) wurde neben der Einspeisung von Isobornylacetat in die Eingabestelle E noch der Duftstoff Dipenten in die Eingabestelle A eingesetzt. Das führte zunächst zu Schwierigkeiten bei den Geruchsbestimmungen an der Aachquelle, die jedoch durch Geschmacksprüfungen weitgehend beseitigt werden konnten.

Die Geschmacksbeobachtungen zeigten weiters, daß ein großer Teil des Markierungsstoffes aus der wässrigen Phase in die gasförmige Phase übergegangen ist, was nicht zuletzt durch die Turbulenz der Aachquelle und ihrer Abflüsse hervorgerufen worden sein dürfte. Dadurch war der in den später zur Verfügung stehenden Wasserproben noch enthaltene Anteil an beiden Geruchsstoffen außerordentlich gering. Da die von uns verwandten Geruchsstoffe allmählich auch vom Sauerstoff, besonders bei Lichteinwirkung, verändert werden können, war die Auswertung, die ja wesentlich später erfolgte, dementsprechend schwierig. Weder die Dünnschichtchromatographie noch die Polarographie oder andere chemische Methoden reichte aus, um diese geringen Spuren zu analysieren. Obgleich die Geruchsempfindung eine quantitative Erfassung nur schlecht ermöglicht, wird dieser schwerwiegende Nachteil jedoch durch die Tatsache wettgemacht, daß mit dem Riechepithel der Nase Geruchsstoffe noch in Verdünnungen festzustellen sind, bei denen die empfindlichsten chemischen Nachweise versagen (F. FEIGL 1960, W. A. SCHNITZER & W. WAGNER 1969).

Alle in Erlangen analysierten Proben zeigten nun eigenartigerweise einen Geruch, der weder dem Dipenten noch dem Isobornylacetat sicher zuzuordnen war. Dafür traten Geruchsnuancen auf, die von schwach über mild, mild-muffig, intensiv bis scharf beißend reichten. Zunächst war dieses Phänomen nicht erklärlich. Erst Laborversuche ergaben eine vernünftige Deutung. Wenn man außerordentlich stark verdünnte Lösungen von Dipenten oder Isobornylacetat mit 3%igem Wasserstoff-superoxid versetzt und einige Tage stehen läßt, so schlägt der Geruch in die auf der Fig. 49 angegebenen Geruchsnuancen um.

Mit größter Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei dem vorliegenden Geruch um die Abbauprodukte oder Oxidationsprodukte des Dipentens und des Isobornylacetats, wobei sich beide durchaus unterscheiden. Von den vorliegenden 100 ml wurden 20 ml mit Wasserdampf abdestilliert, um die Geruchsstoffe anzureichern. Fig. 49 gibt die Geruchskurven wieder, bezogen auf die Destillate. Die erste Spitze

trat am 27. August gegen 24 Uhr auf, was sich gut mit den Geschmacksbeobachtungen vergleichen läßt. Ein weiterer Peak liegt am 28. August gegen 16 Uhr. Dann fällt die Kurve gegen 24 Uhr auf 0 ab. Nach den Geschmacksbeobachtungen und unseren Auswertungen dürfte kaum ein Zweifel daran bestehen, daß diese Geruchsunterschiede von den Oxidationsprodukten des Dipentens herrühren. Auch das Isobornylacetat ist sicher in der Aachquelle ausgetreten, zumal hier im Wasser Geruchsnuancen festzustellen sind, die von intensiv scharf bis scharf beißend in den Destillaten reichen. Wie bei früheren Versuchen immer wieder festgestellt, läuft die Geruchskurve dem Maximum der Schaumkurve nach, und zwar über wesentlich längere Zeiträume. Das dürfte auch das Kurvenbild in Fig. 49 zeigen, wo man deutlich sieht, daß der Hauptanteil der Detergentien bereits am 29. August ausgetreten ist, die veränderten Bestandteile des Isobornylacetats am 30. und 31. August und nach einer Untersuchung am 1. September wiederum am 2., 3. und 4. September festzustellen waren.

Bei künftigen Versuchen müßte man zwangsweise von vornherein größere Mengen an Geruchsstoffen aufgeben und versuchen, sofort die Proben mit Hilfe der Dünnschichtchromatographie und Polarographie quantitativ auszuwerten. Nach dem Gesamtkurvenverlauf (s. Fig. 49) darf man aber sagen, daß beide Geruchsstoffe aus den Eingabestellen A und E in der Aachquelle wieder ausgetreten sind. Alle anderen untersuchten Probeentnahmestellen haben auf Geruchsstoffe nicht angesprochen.

3. 3. 9. Die Ergebnisse mit Uranin (Eingabestelle F)

Die Einspeisestelle befand sich in einem ehemaligen kleinen Massenkalk-Steinbruch des Weißen Jura zeta, rd. 400 m südlich des Ortsrandes von Buchheim. An der Steinbruchsohle befanden sich unter Blockschutt Klüfte, die das eingespeiste Wasser ohne Rückstau aufnahmen. Rund 10 l/s Spülwasser wurden aus einem 200 m entfernten Hydranten über eine Schlauchleitung zugeleitet. In der Zeit der Wassereinleitung von 9.45 bis 14.30 Uhr wurden somit rd. 170 cbm Wasser zur Versickerung gebracht.

Das Markierungsmittel Uranin ist vor der Eingabe in 200 l Wasser aufgelöst und am 26. August zwischen 10.00 und 11.05 Uhr dem Spülwasser beigegeben worden. Zur Verwendung kamen 30 kg gereinigtes und 30 kg technisches Uranin der Firma Siegle/Stuttgart. Letzteres Erzeugnis besteht zu rd. $\frac{1}{3}$ aus Verunreinigungen, so daß insgesamt nur 50 kg Uranin zur Einspeisung gelangten.

3. 3. 9. 1. Die Direktbestimmung von Uranin

Die unmittelbare Bestimmung von Uranin in den unbehandelten Wasserproben mit Hilfe der Fluoreszenzeinrichtung zum ZEISS-Spektrophotometer PM Q II des Geologischen Landesamtes Baden-Würt-

temberg (Dr. W. Käss) brachte in allen untersuchten Proben keine positiven Ergebnisse. Falls an irgendeiner Beobachtungsstelle Uranin ausgetreten ist, lag der Uraningehalt unter 0,02 mg/cbm. Folgende Beobachtungsreihe wurde untersucht:

Tabelle 8: Verzeichnis der mit der Direktbestimmung auf Uranin untersuchten Wässer

Nr.	Bezeichnung	Beobachtungszeitraum	Anzahl der Proben
8	Aachtopf	19. 8. 1969— 2. 3. 1970	308
10	Beuren a. d. A.	27. 8. 1969— 2. 3. 1970	31
11	Eigeltingen		
	Untere Kressenlochquelle	25. 8. 1969— 7. 2. 1970	15
12	Eigeltingen		
	Obere Kressenlochquelle	25. 8. 1969— 2. 3. 1970	65
13	Eigeltingen, Wasserfassung	25. 8. 1969— 7. 9. 1969	15
30	Altheim, Tiefbrunnen	25. 8. 1969— 7. 2. 1970	72
31	Roter Brunnen	26. 8. 1969— 7. 2. 1970	51
33	Boll, Neumühle	25. 8. 1969— 7. 2. 1970	38
34	Heudorf, Mettenbachtal	25. 8. 1969—18. 9. 1969	16
35	Bronner Mühle	26. 8. 1969— 6. 9. 1969	19
36	Beuron, Pumpwerk	26. 8. 1969— 7. 9. 1969	18
37	Thiergarten, Reinbrunnen	26. 8. 1969— 2. 3. 1970	46
39	Eigeltingen, Salzbahnquelle	26. 8. 1969— 2. 3. 1970	31
40	Heudorf		
	Wasserfassung Meßkirch	25. 8. 1969— 2. 3. 1970	44
56	Welschingen, Bleichebohrung	25. 8. 1969— 2. 3. 1970	46
64	Aach, Wasserversorgung	27. 8. 1969—26. 1. 1970	26
69	Volkertshausen, Spinnerei	27. 8. 1969— 2. 3. 1970	14

zusammen 855

3. 3. 9. 2. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Uraninanreicherung mit Aktivkohle

Ab Versuchsbeginn wurden folgende 20 Quellaustritte bzw. Brunnen von F. BAUER (Speläologisches Institut, Wien) mittels Aktivkohle (siehe F. BAUER 1967) auf Uraninaustritte untersucht:

- Beobachtungsstellen Nr. 11, 13, 35 und 36 bis 7. September 1969,
- Nr. 64 und 69 bis 6. Dezember 1969,
- Nr. 29 bis 6. Jänner 1970,
- Nr. 18 bis 7. Februar 1970 und
- Nr. 8, 10, 12, 15, 30, 31, 33, 34, 37, 39, 40 und 56 bis über Ende März 1970.

Bis 7. September waren an jeder Beobachtungsstelle zwei Serien Aktivkohlesäckchen eingehängt, von denen eine täglich oder jeden zweiten Tag und die zweite wöchentlich gewechselt wurde. Danach wurde der Wechsel der Kohlesäckchen in der Regel in größeren Zeitabständen (zuerst 4 bis 7 Tage, ab Oktober bis zu 2 Wochen, ab Dezember bis zu 4 Wochen) durchgeführt. In der Aachquelle (Nr. 8) wurden

die Kohlesäckchen — soweit möglich — in kürzeren Abständen (z. T. täglich) gewechselt. Einige Quellaustritte (Nr. 8, 13, 30, 31, 36 und 37) wurden doppelt bzw. dreifach mit Aktivkohlesäckchen besetzt, um selbst im Falle des Verlustes einer Kohleprobe die Kontinuität der Beobachtung gewährleisten zu können.

Die bis 31. März 1970 entnommenen 606 Aktivkohleproben wurden am Speläologischen Institut, wie von F. BAUER (1967) beschrieben, eluiert. Die Fluoreszenzspektren der Eluate wurden mit einem ZEISS-Spektralphotometer PM Q II mit Fluoreszenzzusatz aufgenommen.

Meßbedingungen: Anregung durch Wolframfadenlampe 6V/5A, Anregungsfilter: Schott Doppelbandinterferenzfilter DAL mit 484 nm, Spaltbreite 0,2 mm, Registrierung der Spektren von 600 bis 500 nm mittels Potentiometerschreiber Servogor, Papiervorschub 30 mm/min. Über die technische Durchführung der Messung der Eluate und die dabei gewonnenen Erfahrungen wird an anderer Stelle eingehend berichtet werden.

Erfahrungsgemäß liefern die in offenen (farbstofffreien) Gewässern exponierten Kohlesäckchen durch die an die Aktivkohle angelagerten organischen Stoffe (vor allem Pflanzendetritus etc.) unter den angeführten Meßbedingungen ein Fluoreszenzspektrum mit einem Maximum bei 530—535 nm. Die Fluoreszenzintensität ist um so höher, je länger die Expositionszeit und je unreiner das Wasser ist. Tiefbrunnen mit reinem Wasser liefern oft keine meßbare Fluoreszenz! Die Kurven dieses Fluoreszenz-Hintergrundes haben eine ausgesprochen konvexe und meist weitgehend symmetrische Form, im Bereiche des Maximums sind sie breit abgerundet (s. Fig. 52, Kurven a, b, g und h). Wenn in den Eluaten Uranin enthalten ist, erhält man Fluoreszenzkurven, die der Summe des Hintergrundes und der Uraninfluoreszenz entsprechen. Hierzu ist zu bemerken, daß das Fluoreszenzmaximum des Uranins in den Kohleeluatens bei 520 nm, also höher als in wässriger Lösung, liegt. Wenn die Uraninfluoreszenz sehr gering ist, wird sie durch den Hintergrund maskiert. Mit zunehmendem Uraningehalt verschiebt sich das Fluoreszenzmaximum von 530 nm gegen 520 nm; gleichzeitig erfahren die beiden ansteigenden Äste der Fluoreszenzkurve eine Versteilung, und die Kurve wird deutlich asymmetrisch (s. Fig. 52, Kurven c—f). Bereits die zunehmende Asymmetrie der Kurven zeigt, daß es sich keinesfalls um eine En-bloc-Verschiebung der breit gestreuten (natürlichen) Hintergrund-Fluoreszenz handeln kann, sondern daß diese durch die zusätzliche Fluoreszenz eines Fremdstoffes mit einem scharf ausgeprägten Fluoreszenzmaximum bei einer Wellenlänge, die von der Wellenlänge des Maximums des Hintergrundes deutlich (aber nicht zu stark) abweicht, modifiziert wird. Wenn die Fluoreszenzintensität des Uranins die Fluoreszenzintensität des Hintergrundes übersteigt, dann erhält der von 600 nm gegen 520 nm ansteigende Ast der Kurve eine konvexe Form; das Fluoreszenzmaximum liegt dann bei 520 nm (siehe

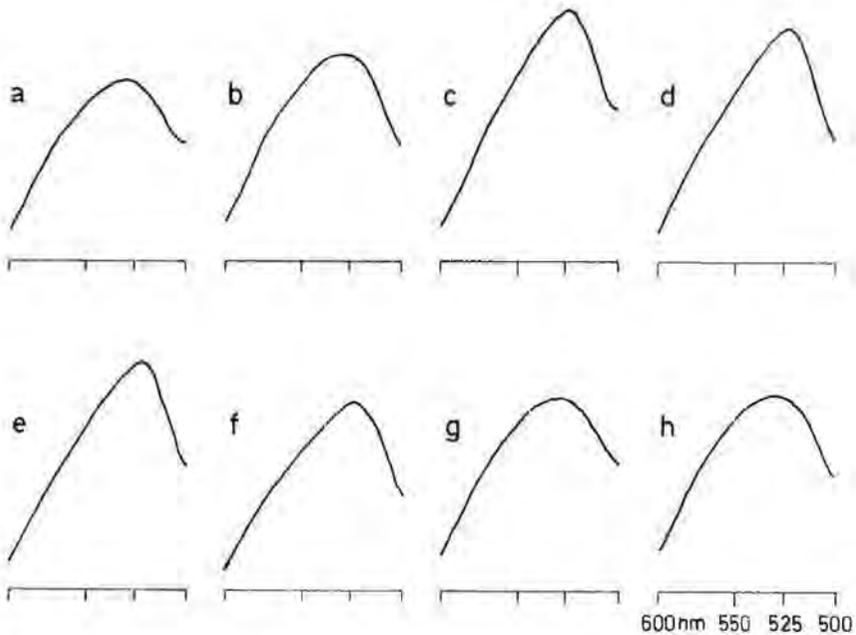


Fig. 52: Fluoreszenzspektren von Aktivkohleproben aus der Aachquelle. Die Kurven umfassen den Wellenlängenbereich 500—600 nm. Die Einhängdauer und das Fluoreszenzmaximum betragen: a = 13.—14. Sept. (530 nm), b = 7.—10. Okt. (528,5 nm), c = 11. bis 12. Nov. (523 nm), d = 23.—25. Nov. (521 nm), e = 25.—29. Nov. (520,5 nm), f = 21. Dez.—8. Jän. (523,5 nm), g = 11.—13. Febr. (528,5 nm), h = 1.—7. März (530,5 nm).

Fig. 53). Solche eindeutige Uranin-Fluoreszenzkurven können mittels Aktivkohlesäckchen unter günstigen Bedingungen bereits bei Uraningehalten des Quellwassers von 0,005 mg/cbm und auch weniger erhalten werden. Kurven der in Fig. 52 (Kurven c—f) abgebildeten Art konnten bei mehreren Markierungsversuchen aus Aktivkohlen gewonnen werden, die knapp vor dem ersten und nach dem letzten durch Direktmessung (Uraninnachweisgrenze 0,02 mg/cbm) nachweisbaren Uraninaustritt im Quellwasser exponiert waren und damit eindeutig den Austritt der ersten und letzten Uraninspuren anzeigten.

Von den vom Markierungsversuch im Bereich der Donauversickerung untersuchten 606 Kohleproben lieferten 587 Proben spektrophotometrisch auswertbare Eluate. Keines der Eluate ergab eine Fluoreszenzkurve der in Fig. 53 gezeigten Art, womit nach den bisherigen Erfahrungen in den oben angeführten Quellen während der Beobachtungszeit Uraningehalte über 0,005—0,01 mg/cbm mit Sicherheit auszuschließen sind.

Eine Anzahl von Proben aus der Aachquelle (Nr. 8) zeigt aber Fluoreszenzkurven mit einer deutlichen Verschiebung des Maximums gegen 520 nm bei einer gleichzeitigen Verteilung der Kurvenäste. In Fig. 54 sind die Wellenlängen der Fluoreszenzmaxima der vom 24. August 1969 bis 28. März 1970 an der Aachquelle entnommenen Proben aufgetragen.

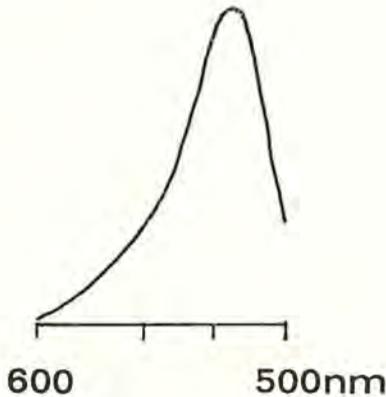


Fig. 53: Fluoreszenzspektrum des Eluates einer stark uraninhalten Kohleprobe (600—500 nm, vgl. Fig. 52). Die Messung erfolgte gegenüber den Kurven der Fig. 52 mit $\frac{1}{20}$ der Verstärkung; bei gleicher Verstärkung wäre das Maximum 20mal höher. Das Aktivkohlesäckchen war drei Stunden lang in Quellwasser mit rund 0,4 mg Uranin/cbm exponiert (Versuch Schneetalpe, 1968).

Die senkrechten Striche geben die Einhängdauer der einzelnen Kohlesäckchen an. Wenn mehrere Kohlesäckchen gleichzeitig eingehängt waren, wurden die Mittelwerte eingetragen. Aus dem Zeitraum 11. bis 21. Dezember 1969 lagen keine Proben vor. Bis Anfang Oktober lagen die Fluoreszenzmaxima um 530 nm („normaler“ Hintergrund), worauf bis etwa Ende November eine langsame Verschiebung der Maxima gegen 520 nm einsetzte. Ab Dezember verlagerten sich die Fluoreszenzmaxima wieder ziemlich kontinuierlich gegen 530 nm. Die Fluoreszenzkurven mit Maxima bei einer Wellenlänge unter 524 nm (November 1969 bis Jänner 1970) zeigen eine deutliche Asymmetrie (Fig. 52, Kurven c—f), während die vor Mitte Oktober 1969 und nach Ende Jänner 1970 entnommenen Proben „normale“ symmetrische Hintergrundkurven lieferten (s. Fig. 52, Kurven a, b, g und h).

In Fig. 55 ist die Häufigkeit der Wellenlängen der 152 untersuchten Aktivkohleproben von der Aachquelle dargestellt (übergreifende Mittel über 3 nm):

- A = 21 Proben vom 24. August bis 21. Oktober 1969,
- B = 50 Proben vom 21. Oktober 1969 bis 31. Jänner 1970,
- C = 31 Proben vom 31. Jänner bis 28. März 1970.

Diese Häufigkeitslinien zeigen deutlicher als die Ganglinie (s. Fig. 54) die Verschiebung der Fluoreszenzmaxima von Oktober bis Jänner.

In Fig. 56 sind die Häufigkeitslinien der Wellenlängen der Fluoreszenzmaxima der 50 Kohleproben von der Aachquelle des Zeitraumes

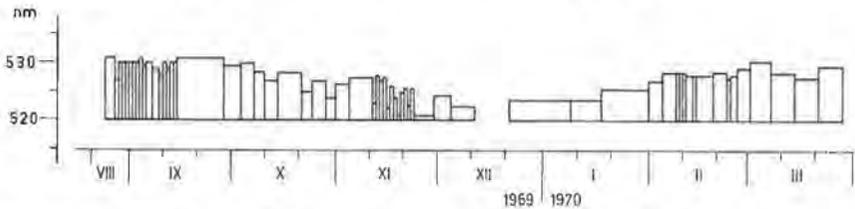


Fig. 54: Ganglinie der Wellenlängenverschiebung der Fluoreszenzmaxima der Aktivkohleproben von der Aachquelle. Die senkrechten Striche geben die Einhängdauer der Kohlesäckchen an. Die Proben vom 11.—21. Dezember gingen verloren. Weitere Erläuterungen im Text.

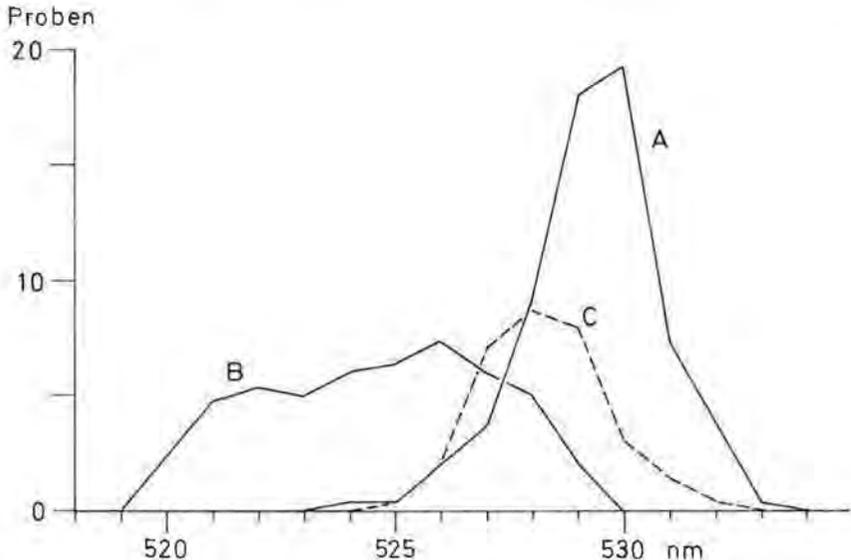


Fig. 55: Häufigkeitslinien der Wellenlängen der Fluoreszenzmaxima der Kohleproben von der Aachquelle.

- A: 71 Proben (24. Aug.—21. Okt. 1969);
- B: 50 Proben (21. Okt. 1969—31. Jän. 1970);
- C: 31 Proben (31. Jän.—28. März 1970).

Weitere Erläuterungen im Text.

21. Oktober 1969 bis 31. Jänner 1970 (Kurve B) und aller übrigen 537 Proben (Kurve A; inkl. Aachproben vor 21. Oktober 1969 und nach 31. Jänner 1970) einander gegenübergestellt. Die Kurven A der Fig. 55 und 56 stimmen mit ihrem Maximum bei 529—530 nm weitgehend überein: Diese Häufigkeitsverteilung der Wellenlängen der Fluoreszenzmaxima ist nach den bisherigen Erfahrungen für den natürlichen Fluoreszenz-Hintergrund der Kohleeluate kennzeichnend. Die Lage der Fluoreszenzmaxima der Kohlen aus der Aachquelle des Zeitraumes 21. Oktober 1969 bis 31. Jänner 1970 (Kurven B der Fig. 55, 56) fällt sowohl in bezug auf die übrigen Aachproben als auch auf alle anderen im Rahmen des Versuches bisher untersuchten Proben deutlich aus dem Rahmen.

Aus diesen Meßergebnissen ist auf Grund der bisher mit der Aktivkohlemethode gewonnenen Erfahrungen zu schließen, daß in der Aach-

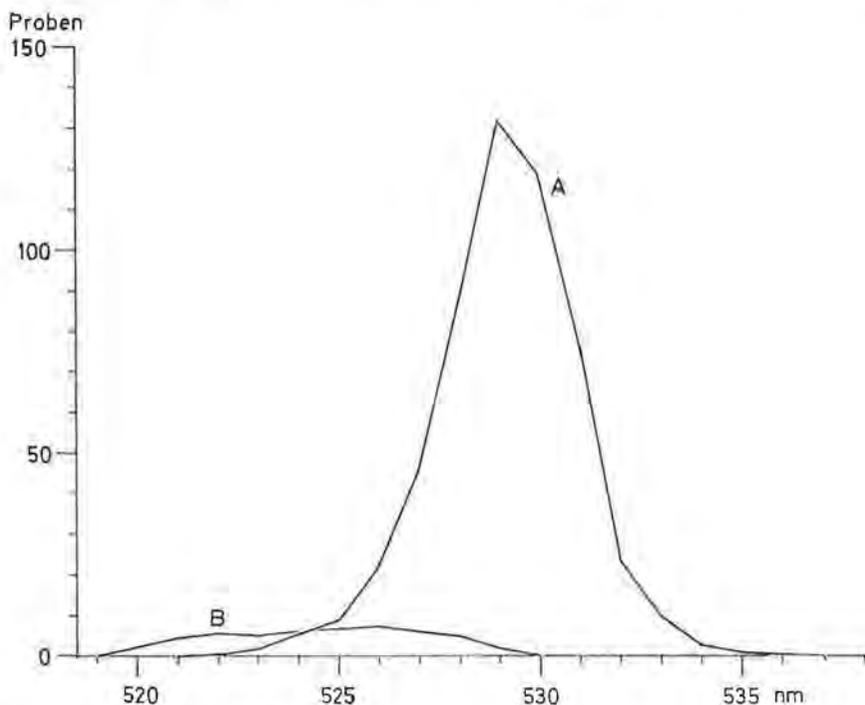


Fig. 56: Häufigkeitslinien der Wellenlängen der Fluoreszenzmaxima aller bis Ende März 1970 im Rahmen des Donauversuches entnommenen Kohleproben.

A: 537 Proben (alle Proben außer den durch Kurve B erfaßten);

B: 50 Proben von der Aachquelle (21. Okt. 1969—31. Jän. 1970).

Weitere Erläuterungen im Text.

quelle Anfang Oktober 1969 ein äußerst schwacher Austritt von Uranin eingesetzt hat. Die Maximalkonzentrationen dürften Anfang Dezember 1969 eingetreten sein. Von da an erfolgte wiederum eine langsame Konzentrationsverminderung. Ende März 1970 waren noch nicht die ursprünglichen Werte (vom August und September 1969) erreicht, was auf einen weiterhin andauernden schwachen Uraninaustritt schließen läßt.

Über die Absolutwerte der Konzentrationen kann nichts ausgesagt werden. Durch die Direktmessung (Durchführung W. Käss) konnte kein Uranin nachgewiesen werden; die Konzentrationen müssen daher kleiner als 0,02 mg/cbm gewesen sein. Nach obigen Feststellungen ist nicht auszuschließen, daß die Maximalkonzentrationen des Uranin in der Aachquelle unter 0,005 mg/cbm lagen.

Die an allen übrigen Quellen bzw. Brunnen eingehängten Kohle-säckchen gaben keine Hinweise auf einen allfälligen dort erfolgten Uraninaustritt.

Der über einen Zeitraum von über vier Monaten ausgedehnte äußerst schwache Uraninaustritt in der Aachquelle (erster beobachtbarer Austritt etwa fünf Wochen nach der Einspeisung, Maximalkonzentration etwa zwei Wochen nach dem ersten Austritt) weist darauf hin, daß nur geringe Mengen des Einspeisungsgutes (50 kg Uranin!) einem äußerst langsam zur Aachquelle bewegten Karstwasserstrom zugeführt worden sind.

Wie erst nachträglich bekannt wurde, haben die Stadtwerke Villingen im Herbst 1969 einen Färbeversuch mit Uranin durchgeführt. Im Rahmen dieses Versuches gelangte nachweislich in der Zeit vom 6. Oktober bis zum 6. November über eine Pumpenleitung (30 l/s) uraninhaltiges Wasser in die Brigach. Die Maximalkonzentration betrug 4,2 mg/cbm. Insgesamt wurden der Brigach (rd. 40 km oberhalb der Donauversinkung am Brühl) rd. 80 Gramm Uranin zugeführt. Die Pumpung wurde am 6. November eingestellt, womit auch die Uraninzufuhr in die Brigach unterbrochen wurde. Wenn das Uranin ohne Verluste bis in die Aachquelle gelangt wäre, würden dort Konzentrationen bis zu 0,02 mg/cbm zu erwarten gewesen sein. Tatsächlich ist jedoch mit einer weitgehenden Zerstörung des Uranins durch Lichteinwirkung auf seinem Weg von Villingen bis zum Brühl zu rechnen. Da die Uraninzufuhr in die Brigach am 6. November unterbrochen wurde, kann der Gang des Uraninaustrittes in der Aachquelle (Maximum etwa Anfang Dezember) nicht mit dem Villingen Versuch in Zusammenhang gebracht werden.

3. 3. 9. 3. Die Untersuchung auf Uranin mittels Aktivkohlefiltration

Von F. HRIBAR wurden aus der Aachquelle im Zeitraum vom 28. August 1969 bis 7. März 1970 26 Wasserproben von jeweils 2,8 l durch Aktivkohlefilter geleitet und die Filterresultate auf Uranin unter-

sucht. Keine dieser Wasserproben erbrachte einen eindeutigen Uraninachweis.

Ferner wurden aus folgenden Wasseraustritten weitere Uraninuntersuchungen ausgeführt, die ebenfalls ohne eindeutiges Ergebnis blieben (Anzahl der Untersuchungen in Klammern): Nr. 10 (17), Nr. 12 (17), Nr. 13 (5), Nr. 30 (8), Nr. 31 (20), Nr. 33 (16), Nr. 37 (22), Nr. 39 (19), Nr. 40 (22) und Nr. 56 (19).

3. 3. 10. Die Ergebnisse mit *Serratia marcescens* (Eingabestelle G)

Am 26. August 1969 herrschte im Bereich der Hauptversickerung der Donau am „Brühl“ zwischen Immendingen und Tuttlingen Vollversickerung. Die Donau reichte zu dieser Zeit bis Fluß-km 174,325 (siehe Fig. 57). Im Abschnitt der Eingabestelle floß noch eine Restmenge von wenigen hundert l/s, die sich auf den letzten Metern in der Hauptsache dem südlichen Steilufer zuwandte und in mehr oder weniger einheitlichem Gerinne unter gut hörbarem Gurgeln versickerte. Im Flußbett liegen Weißjura- und Schwarzwaldschotter, am Fuß des Steilufers sind teilweise Spalten in den „Wohlgeschichteten Kalken“ des Oxfordkalkes sichtbar. Diese Schichten sind dort an vielen Stellen freigelegt.

Die Einspeisestelle liegt 654 m über NN.

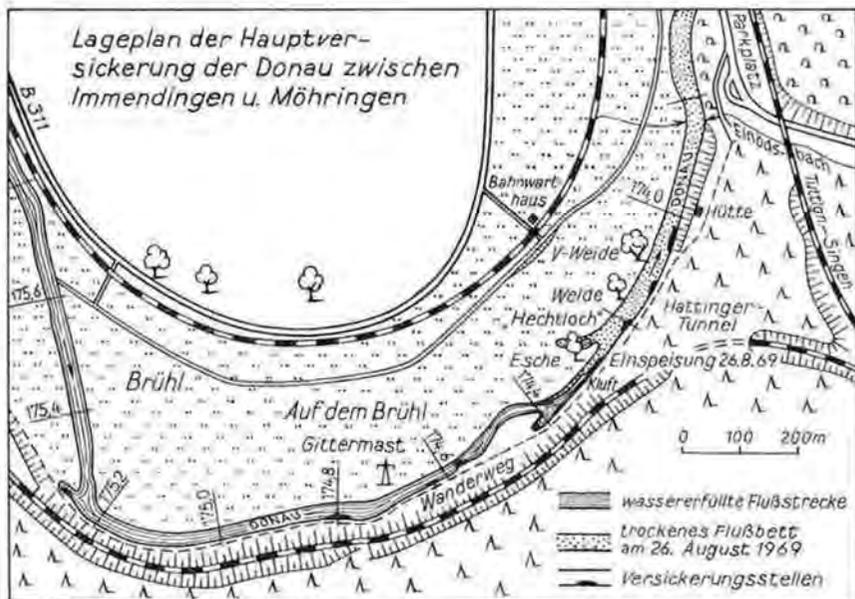


Fig. 57: Lageplan der Hauptversickerung der Donau zwischen Immendingen und Möhringen (Einspeisestelle G).

Die Einspeisung der Keime von *Serratia marcescens* erfolgte um 9.35 Uhr durch H. DOMBROWSKI. Die abgelösten hellroten Kulturen wurden in 1 l Flußwasser aufgeschlämmt und in einem Guß in die größte Schwinde am Ende des Donaulaufes eingegeben. In dieser Aufschlammung befanden sich rd. 30 Trillionen ($30 \cdot 10^{18}$) Keime.

Die eingespeiste Bakterienart aus der Familie der Eubakteriales hat die heute gültige Bezeichnung *Serratia marcescens* BIZIO 1823. (*Serratia*: zu Ehren des 1787 verstorbenen Naturfreundes Serafino SERRATI; *marcescens* = auf Fäulnis lebend.) Ältere Synonyma: *Polenta porporina*; *Monas prodigiosus*.

Mikroskopisch handelt es sich um ein peritrich begeißeltes Stäbchen von 0,5 bis 1,0 μ Länge und 0,5 μ Dicke. Im mikroskopischen Präparat liegt es meist einzeln; selten bildet es 3- bis 6gliedrige Ketten.

Makroskopisch ist diese Spezies durch eine auffallende intensive Rotpigmentierung der Kolonien gekennzeichnet. Dieser aus mehreren Komponenten bestehende Farbstoff ist nicht wasserlöslich (s. Fig. 58 bis 60).

In der Kultur ist das Bakterium gramnegativ, verflüssigt Gelatine, koaguliert Milch, reduziert Nitrat, bildet CO_2 . Die optimale Wachstumstemperatur liegt bei 25 bis 30° C. Bei 37° C wächst der Keim nicht mehr. Der Keim ist ein Aerobier. Er wächst auf verwesenden pflanzlichen und tierischen Materialien. Im Wasser ist er im allgemeinen nicht anzutreffen, doch kann man ihn unter Laborbedingungen bis fünf Wochen in Leitungswasser lebend halten. *Serratia marcescens* ist für den Menschen absolut apathogen.

Dieses für den Menschen völlig unschädliche Verhalten im Verein mit seiner auffallenden Rotfärbung auf Trockennährböden und der Tatsache, daß er kein Wasserbewohner ist, lassen ihn als Markierungsmittel bei Triftuntersuchungen verwenden.

Zur Untersuchung benötigt man sterilisierte Entnahmeröhrchen sowie ein mit den notwendigsten Apparaten ausgerüstetes bakteriologisches Laboratorium: Sterilisator, Autoclav, Brutschrank, Eisschrank, Gasflamme, Agarbrutplatten, Pipetten, Platinösen. Bei längerem Transportweg der Proben — etwa Postversand — kann man einen positiven Befund nur qualitativ bewerten. Um die Ergebnisse bei der Untersuchung auch quantitativ auswerten zu können, war in einem Klassenzimmer in Aach über drei Wochen ein bakteriologisches Behelfslaboratorium eingerichtet worden. Nach Ausstrich von 0,5 ml der Wasserprobe auf Agarplatte ist nach einer Züchtung von 36 bis 48 Std. bei 25° C das Ergebnis makroskopisch ablesbar. Der Gebrauch eines Mikroskopes entfällt.

Zur Eingabe gelangten in eine Schwundstelle im Donaubett bei Brühl (Eingabestelle G) am 26. August 1969 9.35 Uhr $3 \cdot 10^{19} = 30$ Trillionen ($\pm 15\%$) Keime einer frisch angegangenen Agarkultur. Es wurden vom Eingabetermin an bis zum 24. November 1969 insgesamt 635

Sterilproben entnommen und bakteriologisch untersucht. Vor der Einspeisung wurden insgesamt 60 Leerproben im Versuchsgebiet entnommen und untersucht, welche sämtlich negativ waren. Die Leerproben wurden am 2. März und 23. Juli sowie am 23., 24., 25. und 26. August 1969 entnommen.

16 Quellaustritte wurden auf ein evtl. Wiederaustrreten von *Serratia marcescens* (= S. m.) hin bakteriologisch untersucht, von denen 7 positiv waren, also S. m. mitführten, und 9 negativ blieben (s. Fig. 61).

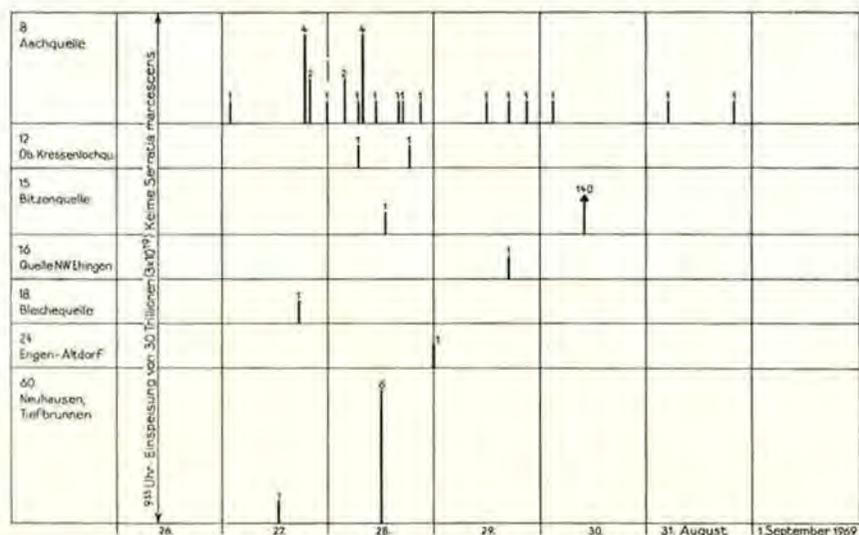


Fig. 61: Darstellung der Austritte von *Serratia marcescens*. Die Probenahmen erfolgten in der Aachquelle (Nr. 8) stündlich; in der Oberen Kressenlochquelle (Nr. 12) viermal, in der Bitzenquelle (Nr. 15) einmal, in der Bleichequelle (Nr. 18) zweimal, in der Quelle nordwestlich Dingen (Nr. 16) einmal, in Engen-Altorf (Nr. 54) viermal und im Tiefbrunnen Neuhausen (Nr. 60) zweimal täglich.

Die Quellaustritte mit positivem Befund, die dadurch einen direkten Zusammenhang mit der Eingabestelle im Donaubett aufdeckten, waren

Fig. 58: *Serratia marcescens*, Reinkultur auf Agarnährboden.

Fig. 59: Aachwasserprobe 16½ Stunden nach Eingabe. Bebrütungsdauer 72 Stunden. Man erkennt deutlich am unteren Rand der Petri-Schale eine rote S.-m.-Kolonie. Die übrigen Kolonien: typische Wasserbewohner.

Fig. 60: Aachwasserprobe 42½ Stunden nach Eingabe. In der Mitte der Petri-Schale eine rote S.-m.-Kolonie (Fotos: H. DOMBROWSKI, 1969).

Fig. 58

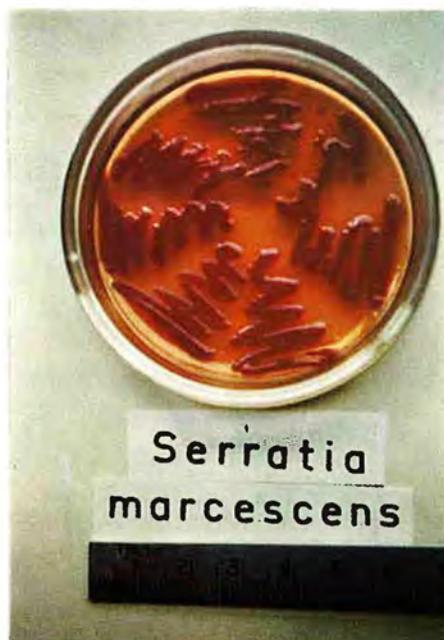
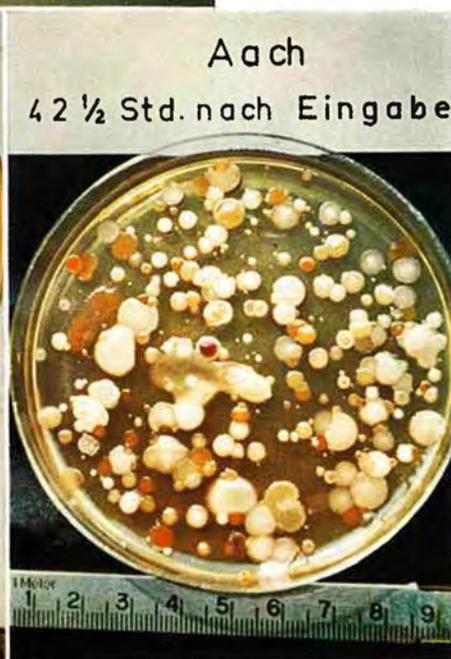


Fig. 59



Fig. 60



- Nr. 8 Aach
 Nr. 12 Eigeltingen, Obere Kressenlochquelle
 Nr. 15 Ehingen, Bitzenquelle
 Nr. 16 Ehingen, Quelle 1000 m NW
 Nr. 18 Welschingen, Bleichequelle
 Nr. 24 Engen-Altendorf, Alte Fassung
 Nr. 60 Neuhausen, Tiefbrunnen.

Tabelle 9: Quellen mit positivem *Serratia marcescens*-Befund

Quellen Nr. u. Name	Anzahl der Züchtungen	Davon pos.	Anzahl der gezüchteten S.m.-Keime	Auftreten in Stunden nach der Eingabe
8 Aach	233	17	25	16 ¹ / ₂ —130
12 Eigeltingen, Obere Kressenlochquelle	39	2	2	45 u. 56 ³ / ₄
15 Ehingen, Bitzenquelle	23	2	141	51 ¹ / ₄ u. 96 ¹ / ₂
16 Ehingen, Quelle 1000 m NW	14	1	1	79 ¹ / ₂
18 Welschingen, Bleichequelle	34	1	1	31 ³ / ₄
24 Engen-Altendorf, Alte Fassung	42	1	1	62 ¹ / ₂
60 Neuhausen, Tiefbrunnen	27	2	7	27 ¹ / ₂ u. 51

Die stärkste Quelle des Untersuchungsgebietes, die Aachquelle, hatte bei insgesamt 233 Züchtungen vom 26. August bis 24. November 1969 17 positive Ergebnisse mit insgesamt 25 wiedergefundenen S. m.-Keimen. Multipliziert man die jeweils aus nur 0,5 ml Aachwasser gezüchteten Keime mit der Schüttung der Aachquelle pro Sekunde, so ergibt sich, daß diese 25 Keime den Durchgang von abgerundet 5,6 Billionen *Serratia marcescens* repräsentieren. Dieser sehr hoch klingende Wert ist aber nur der 6millionste Teil der Einspeisungsmenge, die in der Aach wieder zu Tage trat.

In der Aach erscheint *S. m.* schon 16½ Std. nach Eingabe in die Donauschwinge wieder. 130 Std. nach der Einspeisung ist der letzte Keim durchgegangen. Das Wiederaustreten in der Aach erfolgt in zwei großen Maxima. Das erste Maximum steht in direkter Abhängigkeit zu der relativ kurz vorher erfolgten Einspeisung. Das zweite Maximum steht in Zusammenhang mit der gleichzeitig einsetzenden größeren Schüttung der Aach. Die Tatsache, daß nur ein sehr geringer Bruchteil der Eingabemenge wieder ausgetreten ist, läßt vermuten, daß diese in größere unterirdische Reservoirs abgesunken sein können und dort zurückgehalten werden. Es ist daher gut denkbar, daß in diesen unterirdischen Räumen, bedingt durch größere Niederschläge, Turbulenzen auftreten, welche die Keimzahl in der Aach sprunghaft ansteigen ließen. Nach Beruhigung dieser Turbulenzen im Untergrund bleibt die Anzahl der mitgeführten Keime konstant, um dann spontan 130 Std. nach der Einspeisung bzw. 114 Std. nach dem ersten Wiederaustreten auf den Nullwert abzusinken.

Für die Keim-Retention könnte man rein theoretisch die Keime selbst verantwortlich machen. Diese sind Träger positiver Ladungseinheiten und könnten sich damit leicht an Mineralien des Untergrundes haptiv anlagern. Doch kommt wahrscheinlich der ersteren Deutung infolge der auffälligen Übereinstimmung der Verlaufskurven von Schüttung und Wiederauftreten die größere Bedeutung zu.

Das Auftreten von *S. m.* in den anderen Quellen liegt zeitlich im gleichen Bereich wie das Auftreten der Keime in der Aach (vgl. Tabelle 10).

Das Auftreten von 140 Keimen in einer einzigen Probe überrascht, besitzt aber sicher keinen besonderen Aussagewert. Vermutlich ist zufällig eine kleine Verklumpung von *S. m.*-Keimen zur Untersuchung gelangt.

Tabelle 10: Nach der Schnelligkeit geordnete Reihenfolge der Wiederaustritte von S. m.

nach 16½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 27½ Std.	1 Keim	Nr. 60	Neuhausen, Tiefbrunnen
nach 31½ Std.	1 Keim	Nr. 18	Welschingen, Bleichequelle
nach 33½ Std.	4 Keime	Nr. 8	Aach
nach 34½ Std.	2 Keime	Nr. 8	Aach
nach 38½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 42½ Std.	2 Keime	Nr. 8	Aach
nach 45 Std.	1 Keim	Nr. 12	Eigeltingen, Obere Kressenlochquelle
nach 45½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 46½ Std.	4 Keime	Nr. 8	Aach
nach 49½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 51 Std.	6 Keime	Nr. 60	Neuhausen, Tiefbrunnen
nach 51¼ Std.	1 Keim	Nr. 15	Ehingen, Bitzenquelle
nach 54½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 55½ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach

nach 56 ³ / ₄ Std.	1 Keim	Nr. 12	Eigeltingen, Obere Kressenlochquelle
nach 59 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 82 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 24	Engen-Altendorf, Alte Fassung
nach 74 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 79 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 79 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 16	Ehingen, Quelle 1000 m NW
nach 83 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 89 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 96 ¹ / ₂ Std.	140 Keime	Nr. 15	Ehingen, Bitzenquelle
nach 115 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach
nach 130 ¹ / ₂ Std.	1 Keim	Nr. 8	Aach

In den im folgenden aufgeführten Quellen war *S. m.* in insgesamt 223 nach der Einspeisung durchgeführten Untersuchungen nicht nachweisbar.

Nr. 7	Bargen	20 Untersuchungen
Nr. 10	Beuren	31 Untersuchungen
Nr. 25	Engen, Tiefbrunnen, Felsenbrauerei	45 Untersuchungen
Nr. 26	Welschingen, Drachenlochquelle	24 Untersuchungen
Nr. 56	Welschingen, Bohrung 2000 m N Bleiche	45 Untersuchungen
Nr. 64	Aach, Wasserbohrung	26 Untersuchungen
Nr. 69	Volkertshausen	15 Untersuchungen
Nr. 72	Binningen	15 Untersuchungen
Nr. 74	Watterdingen	2 Untersuchungen

Das Hauptaugenmerk bei den Untersuchungen war auf das Wachsen roter *S. m.*-Kolonien gerichtet. Neben diesen Keimen wuchsen, wie nicht anders zu erwarten war, die ubiquitären Wasserkeime: *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Mikrococcus*, *Coliforme* u. a. m. In den Züchtungsprotokollen wurde eine ins Einzelne gehende Artbeschreibung nicht aufgenommen, sondern lediglich das Wachstumsergebnis „steril“ (0 Keime), „gering“ (1—50 Keime), „mittel“ (50—100 Keime) und „stark“ (über 100 Keime) notiert. Ein Drittel aller Züchtungen (241) war durch starken Bewuchs gekennzeichnet, 209 Proben hatten einen mittelstarken Bewuchs und 181 Proben zeigten ein rel. geringes Keimwachstum, 4 Wasserproben waren steril. Der Gruppe mit starkem Bewuchs gehörte in allen Proben das Donauwasser an, das bei Nr. 2, Immendingen, und an der Einspeisungsstelle G entnommen wurde.

Von den insgesamt 233 Züchtungen aus der Aach zeigten 160 einen starken, 68 einen mittelstarken und nur 5 einen schwachen Bewuchs. Agarplatten mit positivem *S. m.*-Befund gehören allen drei Kategorien an, so daß sich keinerlei Abhängigkeiten von *S. m.*-Auftreten und dem Wachstum der üblichen Wasserkeime ableiten läßt.

Abschließend kann zu den Ergebnissen folgendes gesagt werden:

1. Das Bakterium *Serratia marcescens* ist für die Verwendung als Markierungsmittel als Triftkörper geeignet. Sein Wiederaustreten ist

beweisend für einen unterirdischen Zusammenhang zwischen Eingabestelle und Quellaustritt.

2. Die Beweisführung eines Zusammenhanges zwischen Donauversickerung und sechs Quellen bzw. Wasseraustritten des Untersuchungsgebietes wurde erstmalig mittels S. m. erbracht. Für einen unterirdischen Wasserweg von der Donau zur Aachquelle wurde der Beweis ebenfalls erbracht, der jedoch hier nur als Bestätigung früherer Untersuchungen dient. Überrascht hat hier lediglich das sehr rasche Wiederaustrreten von S. m. bereits nach 16^{1/2} Std. Damit ist S. m. neben allen anderen Markierungsmitteln am raschesten wieder zutage getreten.

3. In neun weiteren Quellen des Untersuchungsgebietes konnte kein Zusammenhang mit der Schwundstelle im Donaubett mittels S. m. nachgewiesen werden.

4. Die zahlreichen zwangsläufig mitgezüchteten Wasserbakterien können weder qualitativ noch quantitativ zu einer wissenschaftlichen Aussage als Triftkörper herangezogen werden.

3. 3. 11. Die Ergebnisse mit braungefärbten Lycopodiumsporen (Eingabestelle G)

Zwischen 12.10 und 12.25 Uhr wurden am 26. August unter Leitung von J. Zörl 45 kg mit Vesuvium H₃R braungefärbte Sporen in die Eingabestelle G eingespeist (s. Fig. 62). Kurz vor der Eingabe wurden die Sporen in Blechtonnen mit 160 l Wasser gut aufgeschwemmt und dann gleichmäßig innerhalb 15 Minuten in das unterste Hauptschluckloch eingespeist. Für die Einspeisung wurde ein Siebtrichter mit Gummischlauch verwendet.

Alle bei der Sporeneinspeisung Beschäftigten wurden nach Abschluß der Arbeiten abgezogen. Keine dieser Personen wurde mit Probenahmen oder Sporennachuntersuchungen befaßt, um eine Verschleppung auszuschließen. Ferner wurde der persönliche Kontakt der beiden Arbeitsgruppen tunlichst vermieden.

Die Entnahme der Planktonnetzproben konnte für die braun- und die grüngefärbten Sporen (s. u.) gemeinsam durchgeführt werden, zumal beide Sporenfarben zumindest in der Aachquelle, aber auch in einer Anzahl anderer benachbarter Quellen erwartet werden durften. Zur Erfassung aller möglichen Wiederaustritte war es aber erforderlich, daß das Beobachtungsnetz der orographischen Lage der Eingabestellen G und I entsprechend nach Westen bzw. Nordosten erweitert wurde. Die Kontrolle erfolgte mit Planktonnetzen aus Nylongaze mit einer Maschenweite von 25 Mikron.

Unter Beobachtung standen die Quellen Nr. 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 24, 25, 33, 39, 56, 60, 64, 67, 69 u. 75. Im allgemeinen wurden in der Zeit zwischen dem 24. August und 7. September von allen Quellen min-



Fig. 62: *Einspeisung von 45 kg braungefärbten Lycopodiumsporen in die unterste Schluckstelle der oberen Donau beim Fluß-km 174 + 325 (Foto: W. Käss, 26. August 1969).*

destens einmal täglich Proben entnommen. Vom 8. bis 18. September erfolgte die Beprobung in einem dreitägigen Rhythmus.

Die Quellen und Brunnen Nr. 8, 10, 12, 15, 33, 39, 56, 64 u. 69 standen noch bis März 1970 unter Kontrolle. Durch eine besondere Einrichtung war es möglich, jeweils über 14 Tage reichende Sammelproben zu gewinnen; nur an den Quellen 12 und 33 mußte man sich auf Tagesproben in zweiwöchigem Turnus beschränken.

An der Aach erfolgte die Probennahme, wie für alle anderen Tracer, in dem im Rathaus eingerichteten Laboratorium (8 a). Zu diesem Zwecke wurde das mit Hilfe einer Pumpe (Förderleistung rd. 0,05 l/s) aus dem Kanal des E-Werkes entnommene Wasser kontinuierlich durch ein Planktonnetz geleitet. Die Probenentnahme erfolgte in der Regel dreimal täglich.

Zu Vergleichszwecken wurde bereits ab 24. August ein Planktonnetz am Aachtopf selbst, unmittelbar unter dem orographisch linksseitigen Überfallwehr (8) eingesetzt, ab 28. August ein weiteres in die rechts des Wehrkanals gelegene „Hauptnebenquelle der Aach“ (8 b).

Nach der Auflassung des Zentrallaboratoriums im Rathaus mußte nach dem 14. September die Probennahme an der Aach neu organisiert werden. Statt der bisher getrennten Entnahmestellen 8, 8 a und 8 b wurde eine neue, unmittelbar am Einlaufwehr zum Krafthaus (8 a') eingerichtet. Diese Stelle entsprach praktisch der bisherigen Zuleitung zum Laboratorium. Auch bei 8 a' wurde eine gleichbleibende Wassermenge in das Planktonnetz gepumpt. Bis zum 30. September erfolgte die Kontrolle kontinuierlich mit einer täglichen Entnahme. In der darauffolgenden Zeit, bis zum März 1970, wurden wöchentlich zweimal Tagesproben gezogen.

Die braunen Sporen konnten in der Aachquelle (Nr. 8), in der alten Wasserversorgung von Engen-Altdorf (Nr. 24), im Brunnen der Felsenbrauerei Engen (Nr. 25), in der neuen Wasserbohrung bei Welschingen (Nr. 56) und überraschenderweise auch in dem 6 km südsüdöstlich der Aachquelle gelegenen Tiefbrunnen der Gemeinde Beuren a. d. Aach (Nr. 10) nachgewiesen werden.

Wie erwartet fand der Hauptaustritt an der Aach statt. Durch unterschiedliche Anströmungsverhältnisse, Verschmutzung der Netze sowie Störung durch spielende Kinder sind die an den Kontrollstellen 8 und 8 b erzielten Ergebnisse problematisch. Dessen ungeachtet liefern sie aber wertvolle Hinweise auf die Schwierigkeit der quantitativen Interpretation von Sporenriftergebnissen. So finden z. B. die isolierten Peaks vom 29./30. August bei 8 und vom 30./31. August bei 8 b keine Korrelation im gleichmäßigen Verlauf der Durchgangskurve in 8 a. Auch die Umrechnung der durch die verschieden lange Einhängedauer unterschiedlichen Sporenzahlen auf Tages- oder Stundenraten ist in natürlichen Gerinnen, in denen die Planktonnetze voll angeströmt werden, nicht zulässig, da nach den Erfahrungen je nach der Schwebstoffführung des Wassers die Durchströmbarkeit der Netze rasch nachläßt und in Extremfällen in wenigen Stunden völlig verlorengeht. Nur dort, wo die volle anströmende Wassermenge über die gesamte Einsatzdauer durch das Netz filtriert wird (wie im Labor bei der Kontrollstelle 8 a), ist eine Umrechnung statthaft. Sie würde aber im vorliegenden Fall, da eine quantitative Berechnung des wiederausgebrachten Sporenmateri als nicht möglich ist, nicht wesentlich mehr bringen.

In der Tabelle 11 werden die an den Beobachtungsstellen 8 und 8 b nachgewiesenen Sporen für den Zeitraum bis zum 13. September wiedergegeben. Für den Vergleich mit den durch die anderen Tracer erzielten Ergebnissen wird aus den oben angeführten Gründen nur der Sporendurchgang an der Kontrollstelle 8 a herangezogen (s. oberstes Durchgangsdiagramm auf Fig. 63). Für die Zeit nach dem 14. September sind die sporenp ositiven Proben aus der Kontrollstelle 8 a' in der nachstehenden Tabelle 13 zusammengefaßt. Alle übrigen Proben waren negativ.

*Tabelle 11: Sporendurchgang bei den Austrittsstellen 8 und 8b (Aachquelle)
in der Zeit vom 27. August bis 13. September 1969*

Quell-Nr. 8 (Aachtopf)			Quell-Nr. 8b (Hauptnebenquelle beim Aachtopf)		
Einhängezeit des Netzes	Sporen/Probe		Einhängezeit des Netzes	Sporen/Probe	
	br. Sp.	gr. Sp.		br. Sp.	gr. Sp.
24. 8., 12.45 —27. 8., 14.00 (insgesamt 3 Proben)	0	0			
27. 8., 14.00 —28. 8., 3.00	210	0			
28. 8., 3.00 —28. 8., 10.00	246	0			
28. 8., 10.00 —28. 8., 18.00	207	0			
28. 8., 18.00 —29. 8., 11.00	186	44	28. 8., 17.00—29. 8., 16.00	98	35
29. 8., 11.00 —29. 8., 15.30	376	240			
29. 8., 15.30 —29. 8., 18.00	120	28			
29. 8., 18.00 —30. 8., 9.30	593	147	29. 8., 16.00—30. 8., 13.00	49	35
30. 8., 9.30 —30. 8., 13.00	39	11			
30. 8., 13.00 —31. 8., 4.00	186	46			
31. 8., 4.00 —31. 8., 16.50	154	22	30. 8., 13.00—31. 8., 17.00	209	54
1. 9., 15.00* — 2. 9., 10.00	108	17			
2. 9., 10.00 — 2. 9., 16.00	235	56			
2. 9., 16.00 — 2. 9., 19.00	126	38	2. 9., 10.10— 2. 9., 19.10	53	0
2. 9., 19.00 — 3. 9., 16.00	184	7			
3. 9., 16.00 — 3. 9., 20.00	48	0			
5. 9., 22.00 — 6. 9., 4.00	212	2			
6. 9., 4.00 — 7. 9., 7.00	62	0	6. 9., 7.00— 7. 9., 8.00	44	0
7. 9., 7.00 — 8. 9., 8.00	59	1			
8. 9., 8.00 — 9. 9., 12.00	45	0	7. 9., 8.00— 9. 9., 12.30	24	0
9. 9., 12.00 —11. 9., 12.00	33	0	9. 9., 12.30—11. 9., 12.30	3	0
11. 9., 12.00 —13. 9., 12.00	9	0	11. 9., 12.30—13. 9., 12.30	0	0

* Netz gewechselt

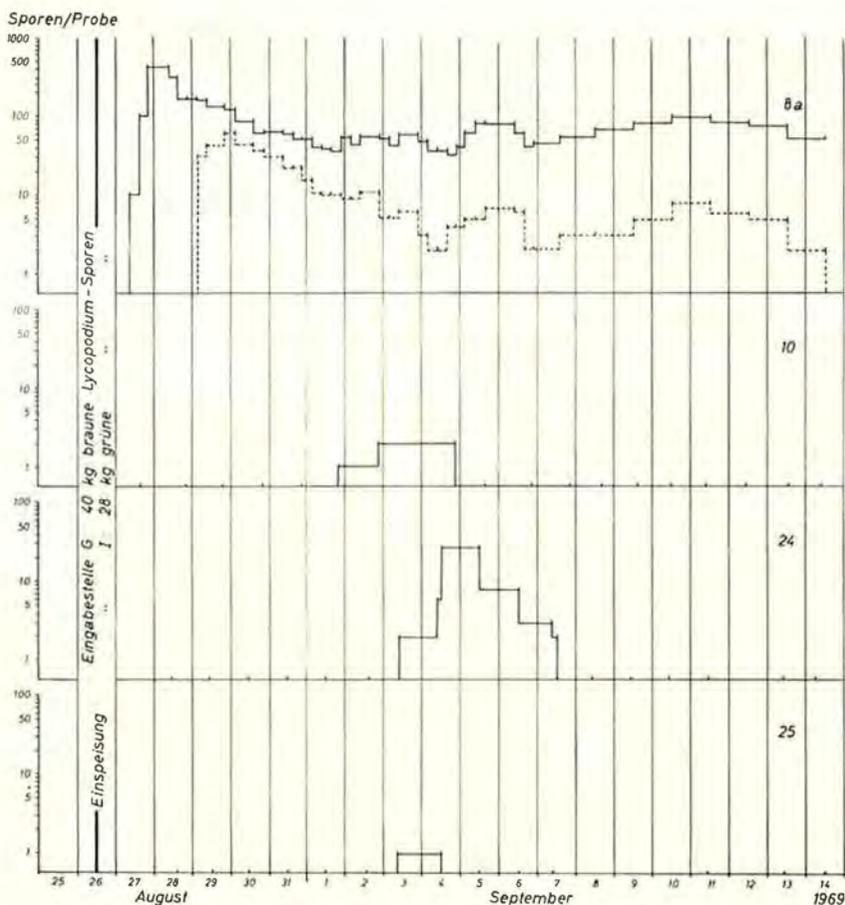


Fig. 63: Darstellung der Sporenaustritte in der Aachquelle (Nr. 8), bei Beuren a. d. A. (Nr. 10), Engen-Altendorf (Nr. 24) und im Brunnen der Felsenbrauerei Engen (Nr. 25). Durchgang der grünen Sporen strichliert.

Tabelle 12: Sporendurchgang bei der Kontrollstelle 8a'

Einhängezeit des Netzes	braune Sporen/Probe
16. 9., 12.00—17. 9., 11.00	52
17. 9., 11.00—18. 9., 12.00	56
19. 9., 12.45—20. 9., 12.00	28
20. 9., 12.00—21. 9., 7.30	13
21. 9., 7.30—22. 9., 12.45	2
22. 9., 12.45—23. 9., 11.00	12
24. 9., 11.00—25. 9., 13.00	2
26. 9., 13.00—27. 9., 13.00	2
12. 11., 17.00—13. 11., 12.30	4
15. 11., 17.00—17. 11., 12.30	2

Bei der Beurteilung des Durchganges der braunen Sporen in der Aachquelle ist die relativ hohe Fließgeschwindigkeit (genaugenommen handelt es sich um die Abstandsgeschwindigkeit) bemerkenswert. Sie beträgt bei einer Entfernung von 11,7 km und einer Höhendifferenz von 178 m zwischen der Eingabestelle G am Brühl und der Aachquelle, bei einem Gefälle von 15,6‰, für das erste Auftreten 450 m/h und für das Maximum des Durchganges 254 m/h.

Da Planktonnetzproben Sammelproben über die ganze Einhängedauer des Netzes darstellen, ist die genaue Festlegung des ersten Auftretens bzw. der Durchgangsspitze problematisch. Im vorliegenden Fall konnten aber durch Kombination der Ergebnisse aus den Beobachtungsstellen 8 und 8 a die Zeitmarken weitgehend eingengt werden.

Im Laboratorium in Aach (8 a) führte bereits die erste gezogene Probe (27. August, 9.00—15.30 Uhr) 98 braune Sporen. In dem unmittelbar am Aachtopf (8) seit dem 24. August eingehängten Netz war aber die am 27. August um 14.00 Uhr gezogene Probe noch negativ, während die darauffolgende bereits 210 braune Sporen lieferte. Man kann also annehmen, daß die ersten Sporen kurz nach 14.00 Uhr eingetroffen sind.

Der Hauptdurchgang in 8 a fällt mit einer ausnahmsweise über 13 Stunden reichenden Sammelprobe (487 Sporen) zusammen. Die nächste Probe mit einem nur über fünf Stunden reichenden Filtrat erbrachte 327 Sporen, so daß die Durchgangsspitze für den 28. August, 10.00 Uhr, angenommen werden kann.

Die hier ermittelten Fließgeschwindigkeiten liegen wesentlich über allen bei früheren Versuchen im Bereich der Donauversickerung beobachteten Werten. Diese Tatsache deckt sich mit den bei anderen kombinierten Markierungsversuchen gemachten Erfahrungen, daß Triftkörper gelösten Stoffen vielfach vorausseilen. Damit stimmen auch die Triftgeschwindigkeiten der gleichzeitig am Brühl in die Donauschwinden eingesetzten Keime (*Serratia marcescens*) gut überein.

Eine sehr schöne Durchgangskurve braungefärbter Sporen lieferte auch die alte Wasserfassung von Engen (Nr. 24). Wie bei allen anderen Beobachtungsstellen südlich der Linie Aach—Engen tritt auch hier das Wasser aus den die Jurakalke überdeckenden Ablagerungen des Tertiärs und Quartärs aus. Zumindest für die größeren Wasseraustritte muß man annehmen, daß sie in der Hauptsache aus dem tieferliegenden Karstwasserkörper alimentiert werden.

Aus Fig. 63 ist ersichtlich, daß die ersten Sporen relativ spät, in der Probe vom 4. September, 9.15 Uhr, aufgetreten sind. Bereits am nächsten Tag erreichte der Durchgang mit 28 braunen Sporen sein Maximum. Die letzte sporenpositive Probe wurde am 7. September gezogen. Weitere Kontrollen bis Ende September verliefen negativ.

Auch der Brunnen der Felsenbrauerei in Engen (Nr. 25) lieferte in der Probe vom 4. September eine braungefärbte Spore. Es handelt sich bei dieser Fassungsanlage um einen 23 m tiefen Brunnen, der in den

die Jurakalke überlagernden würmeiszeitlichen Schmelzwasserschottern steht.

Ebenfalls nur eine Spore wurde aus der im April 1969 im Auftrag der Wasserversorgungsgruppe Hegau abgeteuften Bohrung (Nr. 56) ausgeschwemmt (Probe vom 18. September). Auch dieser noch nicht endgültig ausgebaute Brunnen steht in den jungpleistozänen Ablagerungen. Eine zuvor niedergebrachte Probepbohrung ergab über den Jurakalken eine Mächtigkeit der pleistozänen Sedimente von 50 m. Zur Zeit der Beobachtung war im Brunnen von 35 bis 40 m ein Filterrohr eingesetzt. Dank einer vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe installierten Schreibpegelanlage konnte für die Zeit des Markierungsversuches ein durchschnittlicher artesischer Abfluß von 43 l/s festgestellt werden. Trotz einer von der Bohrfirma eingebrachten Kiespackung ist die Ausschwemmung von Feinsand beträchtlich; ein Umstand, der die Beobachtung mittels Planktonnetzen äußerst erschwerte.

Für die hydrogeologische Situation der Bohrung ist die etwa 200 m südlich gelegene Bleichequelle (Nr. 18) bezeichnend. Sie stellt neben der Aachquelle den größten natürlichen Wasseraustritt im nördlichen Hegau dar. Ihr Wasser wird in Form eines Wallers aus der jungpleistozänen Rinnenfüllung hochgedrückt. Die durchschnittliche Schüttung beträgt 35 bis 45 l/s. Auch für diese beiden Wasseraustritte muß ein Zusammenhang mit dem tieferliegenden Karstwasserkörper angenommen werden. Hier war jedoch kein Sporenaustritt zu verzeichnen.

Wohl das interessanteste Ergebnis der Sporentrift lieferte das Auftreten von braungefärbten Sporen im artesischen Brunnen der Wasserversorgung Beuren a. d. Aach (Nr. 10). Die im Jahre 1937 auf 24 m niedergebrachte Bohrung schüttet im Durchschnitt 8 l/s mit einer sehr gleichmäßigen Temperatur von 13,7° bis 13,9° C. A. SCHREINER (1966) schließt aus der Temperatur, daß es sich um Wasser aus etwa 120 m Tiefe handelt. Auch der Chemismus stimmt mit anderen Karstwasser-aufbrüchen, z. B. der Bleichequelle (Nr. 18) oder der Bohrung Nr. 56 im wesentlichen überein. Der artesische Brunnen in Beuren endet im Unteren Kieslager der pleistozänen Rinnenschotter. Über die Mächtigkeit der darunter mit Sicherheit noch zu erwartenden Unteren Süßwassermolasse ist nichts bekannt.

Obwohl der Sporendurchgang in der Beurener Bohrung nur durch zwei positive Planktonnetzproben nachgewiesen werden konnte, kann dieses Ergebnis als gesichert betrachtet und eine Verschleppung ausgeschlossen werden. Dafür spricht, daß 1. die Entnahme der Proben sowohl in Aach als auch im Bereich Engen—Welschingen von anderen Beobachtern durchgeführt wurde; 2. die positiven Proben unmittelbar hintereinander liegen und erst nach einer Anzahl sporennegativer Proben auftraten und 3. die Zuteilung der Probenserien aus Kontrollgründen alternierend an verschiedene Untersucher erfolgte. So wurde

die Probe vom 2. September in Karlsruhe und jene vom 4. September von Herrn Schulrat E. DOEPFER in Villach (Österreich) mikroskopiert.

3. 3. 12. Die Ergebnisse mit Steinsalz (Eingabestelle H)

Nachdem im Jahre 1904 zwei Färbversuche im Stadtgebiet Tuttlingen wohl wegen der zu gering veranschlagten Farbmenge von jeweils 5 kg Uranin fehlgeschlugen, war man gewillt, bei diesem Versuch eine solche Menge Markierungsmittel einzusetzen, daß ein Nachweis in der Aachquelle mit größter Sicherheit möglich war. Als Einspeisestelle bot sich der Erdfall von 1711 an, den BREUNINGER 1719 erwähnt (s. Fig. 64, 65). Dieser Erdfall ist 1938 ausgebaut und mit einer Betondecke überdeckt worden (s. Fig. 66). Vom nahe vorbeiführenden Seltenbach ist damals ein Hochwasserüberlauf zu dieser Doline geschaffen worden. Seither nimmt sie die nicht ableitbaren Hochwassermengen ohne Rückstau auf. Oberirdisch ist von der ganzen Anlage nichts mehr zu sehen. Sie befindet sich unter und nahe südlich der Kreuzung Alexander- und Liptingerstraße.

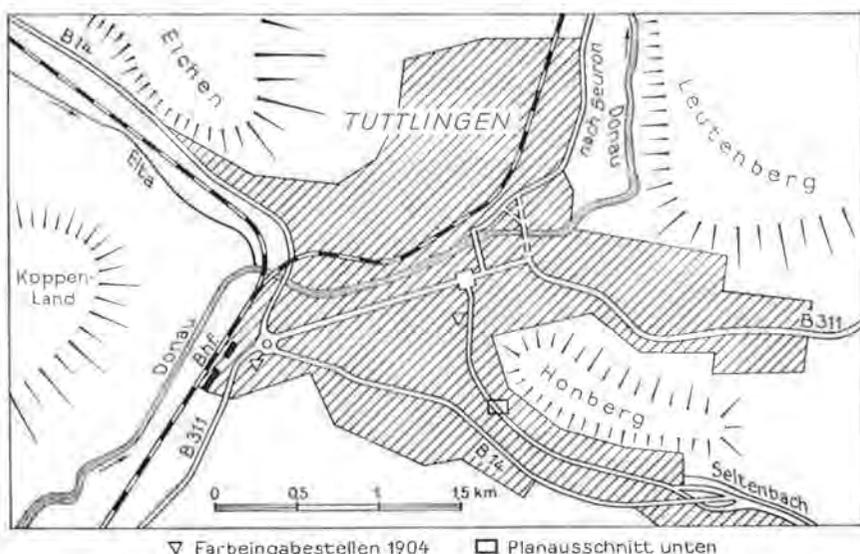


Fig. 64: Stadtplan von Tuttlingen mit Lage des Planausschnittes von Abb. Nr. 65.

Zur Einspeisung wurden 50 Tonnen Steinsalz vorgesehen, die in Form von Streusalz vom Kaliwerk Gewerkschaft Baden in Buggingen, Landkreis Müllheim, in drei Lastzufuhren angeliefert wurden.

Zur Auflösung und Einspeisung einer solch großen Steinsalzmenge sind verhältnismäßig große Aufwendungen nötig. Das Tiefbauamt Tutt-

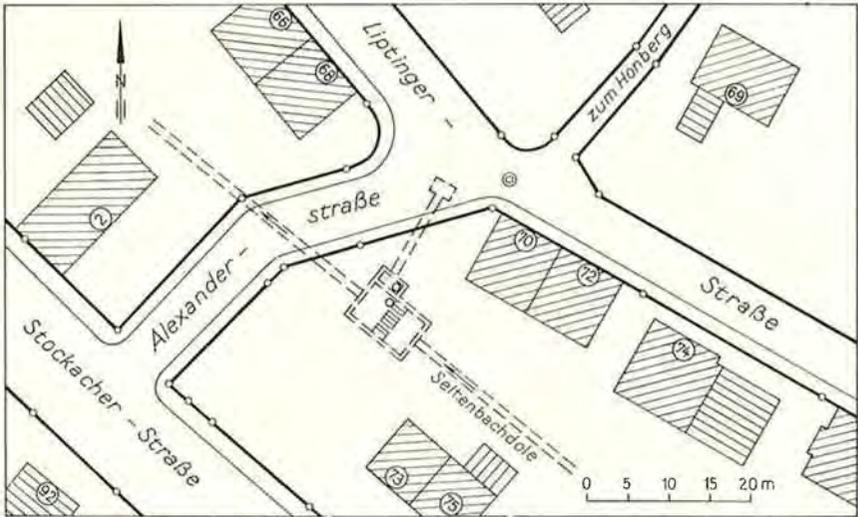


Fig. 65: Lageplan der Einspeisestelle H für das Steinsalz im südlichen Stadtgebiet Tuttingen.

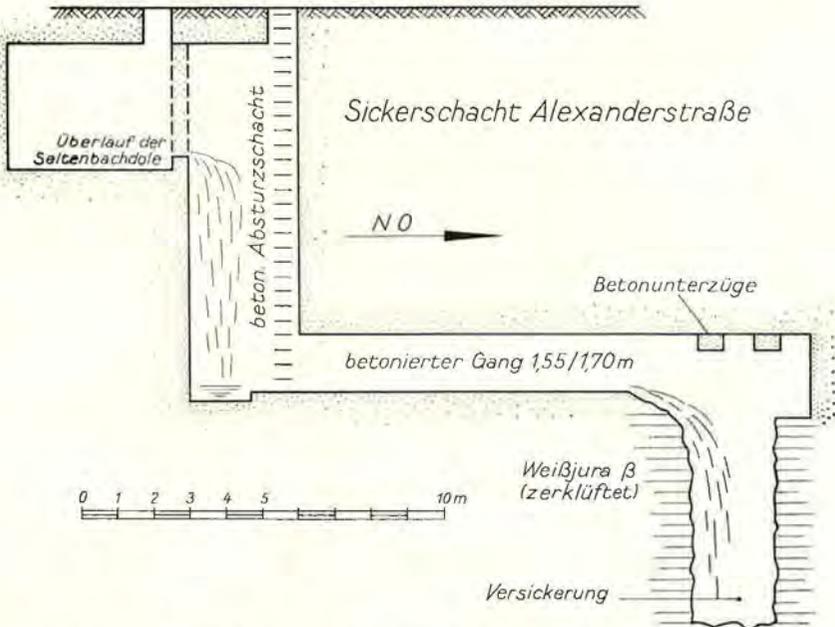


Fig. 66: Schnitt durch den Sickerschacht in der Alexanderstraße in Tuttingen.

lingen löste die Schwierigkeiten in mustergültiger Weise. Es wurde ein etwa 6 cbm fassender Holzkasten gezimmert, in dessen unteren Teil Anschlüsse für ein B-Rohr und für zwei C-Rohre angebracht waren. Mit einem kleinen Schaufellader wurde das auf der Alexanderstraße gelagerte Salz in den Holzkasten gekippt. Zur Verteilung im Holzkasten diente ein C-Strahlrohr. Die aufgelöste Salzsole floß über eine seitlich am Holzkasten angebrachte und mit Plastikfolien ausgekleidete Holzrinne in den Schacht ab (s. Fig. 67). Die Einspeisung dauerte von 8.00 bis 16.00 Uhr. Dabei wurden 250 cbm Leitungswasser gebraucht. Von 16.00 bis 17.00 Uhr wurde mit weiteren 100 cbm nachgespült. Nach Beendigung der Einspeisung war der Holzkasten zu einem guten Teil mit Schlamm aus den Salzverunreinigungen angefüllt¹⁾.

Die Untersuchung auf das eingespeiste Natriumchlorid erfolgte in zweifacher Weise. Der eine Ionenbestandteil, das Natrium, wurde flammenfotometrisch im ZEISS-Flammenfotometer PF 5 mit einer Azetylen-Luft-Flamme ermittelt. Der andere Ionenbestandteil, das Chlorid, wurde titriert, und zwar mit n/100 Quecksilbernitratlösung und Diphenylcarbazon als Indikator. Mit dieser Titrationsmethode läßt sich ein Chloridkonzentrations-Unterschied von 0,01 mval/l oder 0,35 mg/l bei einer Probenmenge von 100 ml sicher erfassen.

Beide Untersuchungsmethoden wurden bis zum 14. September im Behelfslaboratorium in Aach durchgeführt.

Bei früheren Salzungsversuchen bei den Versickerungsstellen der Donau machten sich die Sudabwässer der Saline Dürrheim z. T. in unangenehmer, störender Weise bemerkbar. Beim Sudwechsel wird dort jedesmal die Restlauge mit rd. 16 Tonnen Steinsalz über den Vorfluter Stille Musel in die Donau abgelassen. Daher wurde für diesen Versuch mit der Salinenverwaltung vereinbart, zwischen dem 16. August und dem 8. September keine Restlauge abzulassen.

Das zur Auflösung kommende Steinsalz wurde in loser Form als Streusalz, wie es für den winterlichen Straßendienst Verwendung findet, von der Gewerkschaft Baden, Kaliwerk Buggingen im Landkreis Müllheim, bezogen. Es hatte diese Zusammensetzung:

Natriumchlorid	89,00 Gewichts-%
Kaliumchlorid	1,46 Gewichts-%
Feuchtigkeit (105° C)	4,05 Gewichts-%
Verunreinigungen	5,43 Gewichts-%
Zusammen	99,94 Gewichts-%

Wie man sieht, enthielt das eingespeiste Salz 44,5 Tonnen Natriumchlorid und 0,73 Tonnen Kaliumchlorid. Letzterer Bestandteil störte

¹⁾ Einzelheiten des Salzungsversuches und Fragen der Donauumleitung Immendingen—Fridingen, die die Stadt Tuttlingen betreffen, werden in den „Tuttlinger Heimatblättern“ 1970 unter dem Titel „Der Salzungsversuch 1969 im Stadtgebiet Tuttlingen und sein Ergebnis“ von W. Käss veröffentlicht.



Fig. 67: *Einbringung des Salzes mit einem Schaufellader in den Holzbottich zur Auflösung. In einer ausgekleideten Holzrinne fließt die Sole in den Sickerschacht (Foto: W. Käss, 1969).*

teilweise die Kaliumuntersuchung von der Einspeisestelle A des Kali-düngesalzes bei Immendingen (siehe dort).

In der Kurvendarstellung in Fig. 68 ist zu erkennen, daß am zweiten Tag nach der Einspeisung in den späten Abendstunden die Natrium- und Chloridwerte der Aachquelle deutlich anstiegen. Am 29. August um 6.00 Uhr erreichte die Salzföhrung ihren Höhepunkt. Fast ebenso rasch wie der Anstieg folgte der Rückgang der Natrium- und Chloridkonzentrationen auf die ursprüngliche Höhe. Genaugenommen sank der Salzgehalt nach dem Durchgang der Salzwelle unter die Werte vor dem Salzdurchgang. Offenbar erfuhr die Salzföhrung der Aachquelle durch die starken Niederschläge vom 26. auf 27. August eine Verdünnung. Die niedrigen Natrium- und Chloridwerte hielten sich bis zum 3. September und stiegen von da an wieder langsam an.

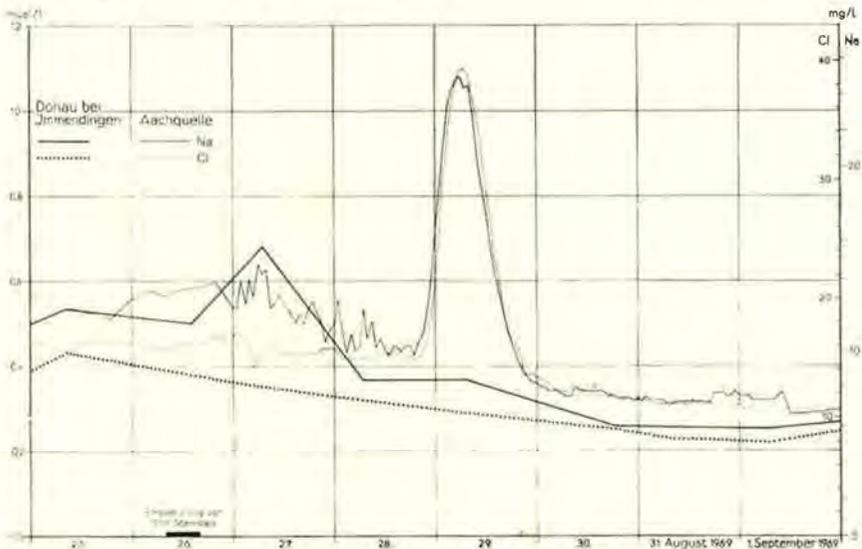


Fig. 68: Gangkurven des Natrium- und Chloridgehaltes in der Aachquelle und in der Donau bei Immendingen.

Die Natrium- und Chloridföhrung der Donau bei Immendingen läuft zu den Kurven der Werte in der Aachquelle nahezu parallel, sie liegen meistens unter diesen. Lediglich einige Natriumwerte zeigen eine starke Erhöhung. Natrium ist in der Donau stets, in der Aachquelle fast immer mehr als Chlorid vorhanden, wenn man die Äquivalente betrachtet.

Unter Berücksichtigung der Wasserföhrung der Aachquelle wurden dort ziemlich genau 500 000 Grammäquivalente Natriumchlorid ausge-tragen; das sind 29,4 Tonnen. Von den eingespeisten 44,5 Tonnen Natriumchlorid sind dies nur 66,2 Gewichts-%.

Eine Erhöhung von Natrium und Chlorid war nur in der Aachquelle zu beobachten. Bis zum 22. November wurden von dort 281 Proben untersucht. Nach dem 29. August war jedoch keine erhöhte Salzföhrung mehr zu verzeichnen, die auf die Einspeisung zuröckzuföhren war.

Folgende Übersicht gibt die zusammengefaßten Ergebnisse der Beobachtungsstellen, die **keine** erhöhte Natriumchloridföhrung aufwiesen:

Tabelle 13: Verzeichnis der Beobachtungsstellen, die keine erhöhten Natrium- und Chloridgehalte aufwiesen

Nr.	Bezeichnung	Beobachtungs- zeitraum	Proben- anzahl	Durchschnittlicher Gehalt an	
				Natrium (mg/l)	Chlorid (mg/l)
2	Donau/Immen- dingen	23. 8.—20. 9.	34	11,6	15,3
10	Beuren a. d. A.	27. 8.— 3. 11.	25	8,2	9,2
12	Obere Kressen- lochquelle	25. 8.— 3. 11.	48	5,4	13,7
13	Untere Kressen- lochquelle	25. 8.— 7. 9.	13	5,9	14,5
18	Bleichequelle	25. 8.— 7. 9.	27	8,8	19,3
56	Bleichebohrung	25. 8.— 2. 11.	40	8,6	19,5
64	Aach, Pumpwerk	27. 8.— 3. 11.	24	6,3	15,2
69	Spinnerei Volkertshausen	27. 8.—18. 9.	12	11,5	17,4

Wo die fehlende Menge von rd. $\frac{1}{3}$ der eingespeisten Salzmenge verblieb, kann nur schwer beantwortet werden. Es besteht durchaus die Möglichkeit, daß die spezifisch schwere Salzsole in den tiefen Karst abgesunken ist. Da die Einspeisestelle im Weißen Jura beta liegt, muß das Wasser mit den Markierungsmitteln auf dem Weg zur Aachquelle mehrere Schichtglieder des Weißen Juras nach oben überwinden. Falls Teile der Salzsole diesen Aufstieg nicht mitmachten, fehlen diese bei der Bilanzbildung. Ferner können weitverzweigte Seitenarme im Karst eine Vermischung bewirkt haben, so daß deren Anteile infolge der starken Verdünnung bei der Bilanzbildung nicht mehr zur Geltung kamen. Auf die früher erwähnte Ungenauigkeit bei der Messung der Aachwasserföhrung sei ebenfalls noch hingewiesen.

3. 3. 13. Die Ergebnisse mit grüingefärbten Lycopodiumsporen (Eingabestelle I)

Die Einspeisung von 28 kg grüingefärbten Lycopodiumsporen erfolgte in den Abwasserversickerungsschacht der Gemeinde Neuhausen ob Eck auf der Hochfläche der Alb am 26. August von 12.10—12.20 Uhr (Leitung: V. MAURIN). An dieser etwa 1 km östlich der Ortschaft in einer Mulde gelegenen Stelle (735 m über NN) werden seit 1962 die in einer mecha-

nisch-biologischen Kläranlage vorgereinigten Abwässer von Neuhausen versickert (s. Fig. 69). Auf Anraten von H. KIDERLEN wurde der heute bis in etwa 12 m Tiefe mit Betonringen ausgebaute Schacht an der Stelle eines alten Erdfalles abgeteuft. Auf seinem Boden sind an zwei Punkten klaffende Karstspalten in den hier anstehenden gebankten Zeta-Kalksteinen des Weißen Jura aufgeschlossen. Ein Versickerungsversuch ergab eine Schluckfähigkeit von mehr als 150 l/s.



Fig. 69: Eingabestelle I. Hier wurden 28 kg grüengefärbte *Lycopodium*sporen mit Hilfe eines Feuerwehrschlauches direkt in die offenen Karstspalten am Boden des 12 m tiefen Abwasserschachtes der Gemeinde Neuhausen ob Eck eingebracht. Im Vordergrund der bereits aufgeschlammte Sporenbrei, rechts der Tankwagen für das benötigte Spülwasser. Am Bild ist die sehr ausgeglichene Morphologie der Albhochfläche zu erkennen (Foto: V. MAURIN, 26. August 1969).

Zur Zeit der *Lycopodium*einspeisung flossen dem Sickerschacht gleichmäßig etwa 5 l/s geklärte Abwässer zu. Die Sporen wurden vor ihrer Einbringung in 400 l Leitungswasser aufgeschlammmt und mittels eines Seihtrichters und eines Feuerwehrschlauches unmittelbar in die abführenden Karstspalten eingespült. Dabei wurden dem Sporenbrei noch insgesamt 700 l Wasser zugesetzt und nachgespült.

Von derselben Stelle aus wurde im März 1962 ein Färbversuch durchgeführt (W. Käss 1965).

Die grünen Sporen konnten nur in der Aachquelle nachgewiesen werden. In den im Laboratorium im Rathaus der Stadt Aach gezogenen Planktonnetzproben zeigten sich die ersten grünen Sporen in der Probe vom 29. August, 13.30 bis 9.30 Uhr (s. Fig. 63). Der Hauptdurchgang ist mit 30. September, 0.00 Uhr anzusetzen. Alle folgenden Proben bis zum 14. September, 10.00 Uhr waren positiv. Nach diesem Zeitpunkt sind zunächst keine grüngefärbten Sporen mehr nachgewiesen worden. Erst die Kontrolle der Entnahmestelle 8 a' von Februar und März 1970 erbrachte für die Zeit vom 10. Februar, 12.00 Uhr, bis 11. Februar, 17.00 Uhr, und vom 15. Februar, 11.00 Uhr, bis 16. Februar, 17.20 Uhr, je zwei grüne und für die Probe vom 16. Februar, 17.20 Uhr, bis 19. Februar, 8.30 Uhr, eine grüne Spore. Diese neuerliche Ausbringung der Sporen deckt sich mit dem ersten starken Ansteigen der Schüttung in der Aachquelle nach den Wintermonaten (s. Tafel V).

Aus der Entfernung von 15,4 km zwischen Eingabestelle und Aachquelle ergab sich für das erste Auftreten der Lycopodiumsporen eine Fließgeschwindigkeit von 233 m/h, für ihren Hauptdurchgang eine solche von 178 m/h.

Im Vergleich mit dem im März 1962 von derselben Eingabestelle aus durchgeführten Färbeversuch (W. Käss, 1965) zeigen sich wesentlich geringere Fließgeschwindigkeiten. Für das erste Auftreten von Farbstoffspuren wurden damals 320 m/h und für die Durchgangsspitze 290 m/h errechnet. Dies mag darauf zurückzuführen sein, daß beim Versuch 1962 die Schüttung der Aachquelle während des Hauptdurchganges der Farbe von 10,9 cbm/s auf 8,5 cbm/s zurückging. Dagegen kam es beim kombinierten Markierungsversuch 1969 durch das unmittelbar nach der Einspeisung auftretende Donauwasser in der Aachquelle zu einem starken Schüttungsanstieg (27. August 9,2 cbm/s, 28. August 13,5 cbm/s, 30. August 15,2 cbm/s). Es wäre denkbar, daß die von der Albhochfläche abfließenden Sickerwässer dadurch rückgestaut wurden. In der Triftrichtung Neuhausen—Aach liegt auch die Eingabestelle E. Es läßt sich nicht entscheiden, ob die dort eingespeisten 262 kg Detergentien, die den Sporen vorauseilten, auf deren Trifteigenschaft und Fortbewegung von Einfluß waren.

3. 4. Zusammenfassung der Ergebnisse des kombinierten Markierungsversuches 1969

Alle früheren Versuche sind von W. Käss (1965) ausführlich beschrieben worden, auf ihre Einzelbeschreibung kann hier verzichtet werden. Dafür sind die Ergebnisse in tabellarischer Form einander gegenübergestellt (Tabelle 14, 15).

Sofern sie zu ermitteln war, wird in den Tabellen die Aachquellenschüttung angegeben. Der Versuch von Worndorf am Ostrand des Versuchsgebietes ist vor allem deshalb bemerkenswert, weil der einge-

setzte Farbstoff nicht nur in der Aachquelle, sondern auch im Krebsbachtal oberhalb Eigeltingen austrat. Dies ist hervorzuheben, da bei den Versuchen 1969 einige Markierungsmittel, die im westlichen Versuchsgebiet eingesetzt wurden, gleichfalls an anderen Stellen als an der Aachquelle austraten. Soweit die Markierungsversuche von den Donauversickerungsstellen Brühl und Fridinger Schleife halbwegs quantitativ auswertbar sind, werden sie in den Fig. 70 u. 71 den Ergebnissen von 1969 gegenübergestellt. Die Kurven für die Salzungsversuche 1908 und 1957 bei Fridingen zeigen eindringlich die Schwierigkeiten bei der Chloridbestimmung durch Abwassereinflüsse.

Die Markierungsversuche im Gebiet zwischen Donau und Aach sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der Färbversuch von 1966 im Tal nördlich Engen war, wie sich später herausstellte, deshalb ergebnislos, weil unter den Talkiesen undurchlässige Bändertone lagern. Die damalige Eingabestelle liegt in der Nähe der jetzigen Einspeisung C. Erstere lag etwa in der Mitte der Talaue, letztere unmittelbar am Hangfuß.

Tabelle 14: Frühere Markierungsversuche an den Donauschwinden beim Brühl und bei Fridingen

Eingabestelle	Markierungsstoff	1. Nachweis nach Std.	m/Std.	Hauptaustritt nach Std.	m/Std.	Ausbringen (‰)	Aachquellenschüttung (cbm/s)
Brühl:							
1869	14 kg Anilinrot	(kein Austritt festgestellt)					
22. 9. 1877	600 kg Schieferöl			60	195		
24. 9. 1877	10 t Salz	50	233	60	195	100	3,5
9. 10. 1877	10 kg Fluoreszein			60	195		
6. 8. 1907	20 kg Uranin	48	243	96	122		5
Fridingen:							
26. 8. 1907	10 kg Uranin	rd. 175	105	195	95		
11. 11. 1908	25 t Salz	rd. 130	141	180	100	100	1,1
27. 8. 1957	50 t Salz	79	235	179	102	100	6,2

Bevor die Ergebnisse der **Markierungsversuche 1969** zusammengefaßt werden, muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß kurz nach

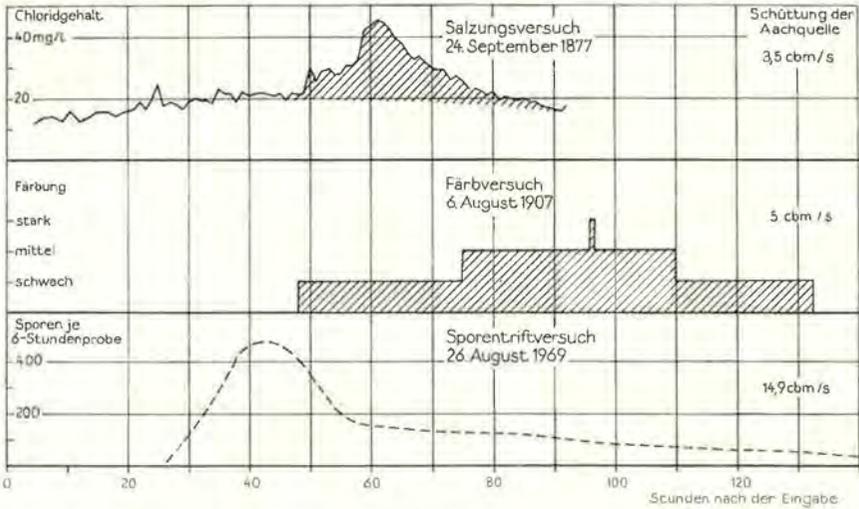


Fig. 70: Gangkurven der früheren Markierungsversuche Brühl—Aachquelle und Sporendurchgang von der Einspeisung am 26. August 1969.

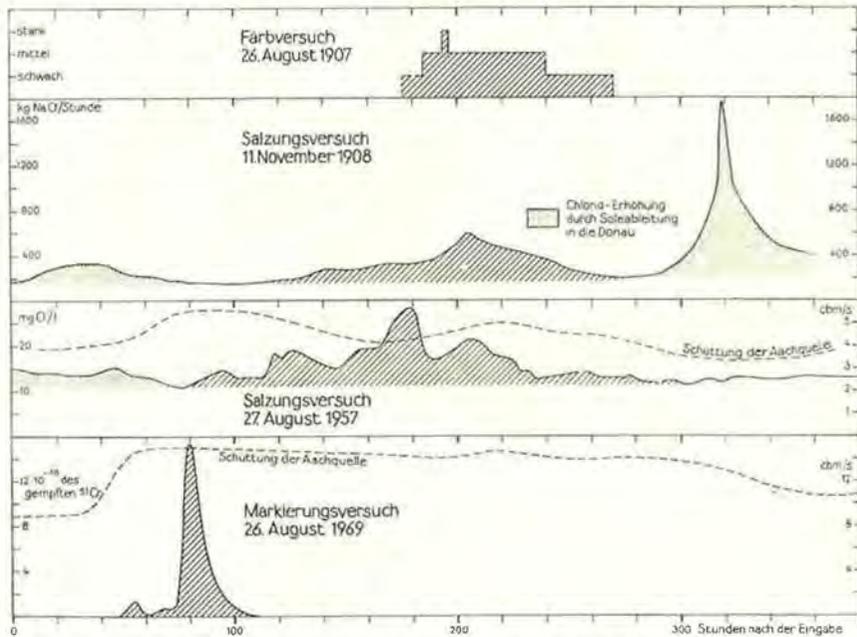


Fig. 71: Gangkurven der früheren Markierungsversuche Fridingen—Aachquelle und Chrom-51-Durchgang von der Einspeisung am 26. August 1969.

Tabelle 15: Frühere Markierungsversuche im Gebiet der Donauversickerung—Aachquelle

Eingabestelle	m NN	Markierungsstoff	Eingabezeit	Austrittsstelle	Höhenunterschied	Entfernung km	Gefälle (‰)	1. Nachweis n. Std.	= m/Std.	Maximum n. Std.	= m/Std.	Ausbringen ‰	Aachquellen-schüttung (cbm/s)
Tuttlingen Grundwasser	640	2x5 kg Fluoreszein	1904	(kein Austritt festgestellt)									
Wasserburger Tal	540	2 kg Uranin	4. 5. 1928	Aach	65	3,0	21,7	12 1/3	243	rd. 21	145	98	8—9
Emmingen ab Egg	740	4 kg Uranin	22. 6. 1928	Aach	265	9,4	28				rd. 135		
Kriegertal	610	4 kg Uranin	31. 7. 1928	Aach	135	6,5	21				rd. 90		
Westl. Neuhäusen ob Eck	rd. 800	35 kg Uranin	2. 12. 1958	Aach	325	14,7	22	rd. 140	rd. 100	220	67	70	6
Sö. Neuhäusen ob Eck	rd. 715	35 kg Uranin	14. 3. 1962	Aach	240	15,2	15,7	rd. 50	320	54 384	290 40	1. Welle: 90 2. Welle: 5	9,4 15
Worndorf	rd. 680	5 kg Uranin	9. 12. 1963	Aach Eigeltinger Quellen	205 160=200	18,9	11 10,5—13	192	97	240	77	15,2	7
Im Tal nördl. Engen	rd. 530	10 kg Uranin	13. 6. 1966	(kein Austritt festgestellt)								rd. 3	
Krebsbach	rd. 596	3 kg Uranin	15. 12. 1967	gefaßte Quelle Eigeltingen				(unmittelbarer Übertritt aus dem z. T. trockenfallenden Bachbett in die Karstquelle zur Wasserversorgung Eigeltingen)				12	

den Einspeisungen sehr starke Niederschläge fielen. In der Regenmeßstelle Aach fielen vom 26. auf 27. August — jeweils 7.00 Uhr — 31,8 mm Regen. Dies war dort der höchste Tagesniederschlag des Jahres 1969. Im Versuchsgebiet setzte der Regen erst in den Abendstunden ein. Bald nach Mitternacht überflutete auch die Donau wieder die Hauptversickerungsstrecke. In der Fridinger Schleife stieg sie bis fast an den vorletzten Brunnenring, das sind rd. 1,5 m.

Es war nicht beabsichtigt, die Versuche zu einer Zeit durchzuführen, in der die Donau Hochwasser führt und in der der Karstwasserstand hoch ist. Das Fließverhalten im Versuchsgebiet gerade bei extremen Verhältnissen kennenzulernen darf indessen als Gewinn angesehen werden. Eine Wiederholung unter ähnlichen Bedingungen dürfte nicht so bald möglich sein. Die Fließzeiten sind somit kürzer als unter durch-

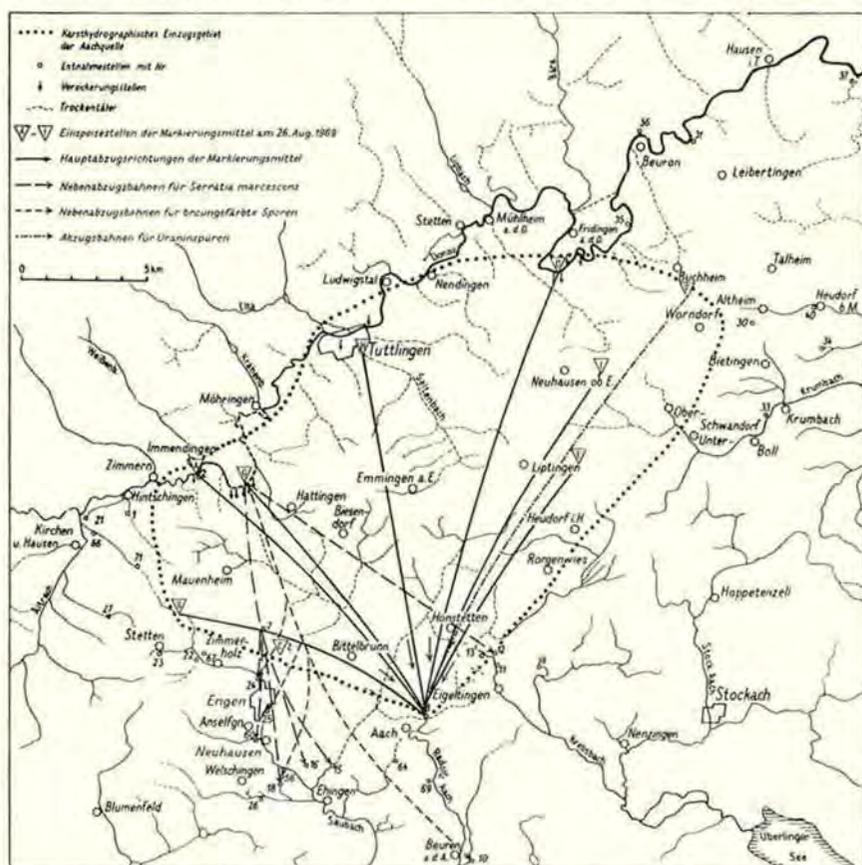


Fig. 72: Kartenmäßige Darstellung der Ergebnisse des Markierungsversuches vom 26. August 1969.

schnittlichen Bedingungen. Die Nebenausstritte der Einspeisungen bei der Hauptversickerung der Donau, die im Engener Raum verzeichnet wurden, wären sehr wahrscheinlich unter anderen Bedingungen überhaupt nicht in Erscheinung getreten. Diese nur mit den Triftkörpern Sporen (0,035 mm Durchmesser) und Bakterien (0,001 mm Durchmesser) nachgewiesenen Nebenausstritte wurden mit Fließgeschwindigkeiten erreicht, die derjenigen zur Aachquelle entsprechen. Bei langsamer Fließbewegung wären die Sporen wohl sedimentiert worden, die Bakterien im lebensfremden Milieu wohl abgestorben, bevor sie die Nebenausstrittsstellen erreicht hätten.

Die **Triftstoffe** haben sich bei diesem Großversuch durchaus bewährt (s. Fig. 72 und Tafel IV, V). Wenn man die Fließzeiten von den beiden vergleichbaren Einspeisestellen bei Immendingen (A) und bei der Hauptversickerung am Brühl (G) zur Aachquelle betrachtet, findet man, daß die Triftkörper die unterirdischen Gerinne wesentlich schneller überwandern als die gelösten Stoffe.

Die Abstandsgeschwindigkeiten für jeweils den ersten Nachweis sind:

Serratia marcescens	710 m/Std.
braungefärbte Lycopodiumsporen	450 m/Std.
Kalisalz	364 m/Std.
Duftstoff-Dipenten	422 m/Std.

Man könnte dies damit in Zusammenhang bringen, daß die Donau nach längerer Zeit der Vollversickerung in der Nacht zum 27. August 1969 die Versickerungsstrecke überflutete. Die durch das Donauhochwasser und durch die unmittelbare Einspeisung von Niederschlagswasser in das Versuchsgebiet bedingte Welle im Karstwasserkörper beschleunigte mit Sicherheit die auf dem Weg befindlichen Markierungsstoffe. Wahrscheinlich nahmen die Markierungsmittel vom Brühl aus wenigstens teilweise ihren Weg über höher liegende, zuvor trockene Karstwasserschläuche in Form von reinen Schwerkraftsgerinnen. Somit eilten die Triftkörper dem allgemeinen Karstwasserfluß voraus. Damit konnten vor allem die Spitzen der Triftstoffe, die ja bevorzugt mit dem Hauptstromstrich wandern, die in Lösung befindlichen Markierungsmittel überholen.

Ein ähnlicher Fall wurde im Lurhöhlensystem bei Graz beobachtet, wo sich bei wiederholten Markierungsversuchen bei Normal- und Mittelwasserständen Wandergeschwindigkeiten bis zum ersten Wiederaustritt der Markierungsstoffe von etwa 80 m/Std. ergaben. Ein beobachtetes Hochwasser, das durch die begehbaren höherliegenden Höhlenstockwerke brauste, erreichte aber eine Geschwindigkeit von 4000 m/Std.

Nur A. Knop (1878) gibt für einen im September 1877 vom Brühl aus durchgeführten Salzungsversuch das Auftreten „der ersten Spuren einer Versalzung“ in der Aachquelle bereits 20 Stunden nach der Einspeisung an. Heute weiß man, daß die Chloridgehalte der Donau und somit auch der Aachquelle durch Soleableitungen starken Schwankungen unterworfen sind. Daher kann man bei einer kritischen Betrachtung der von A. Knop angegebenen

Werte den reellen, auf die Salzung zurückzuführenden Anstieg erst 50 Stunden nach der Einspeisung ansetzen. Damit würde auch der von ihm mit 60 Stunden ermittelte Hauptdurchgang übereinstimmen.

Im süddeutschen Karst sind Sporen über größere Entfernungen noch nie eingesetzt worden. Bei kleineren Versuchen brachten sie keine befriedigenden Ergebnisse. Auch mit *Serratia marcescens* lagen noch sehr wenig Erfahrungen vor (G. SCHULZ u. a. 1961). Um so beachtlicher waren die Ergebnisse, die insbesondere mit den Sporen erzielt wurden. Auch bei den Bakterien war dank der sehr hohen eingesetzten Keimzahl der Nachweis in der Aachquelle eindeutig. Es war auch ein Maximum auszumachen, für eine einwandfreie quantitative Auswertung war jedoch die Anzahl der insgesamt ausgebrachten Keime zu gering. Um hier Fortschritte zu erzielen, muß entweder die Probemenge oder die Keimzahl für die Einspeisung vergrößert werden. Ein unbestrittener Vorteil der Triftkörper ist der, daß sie in fast unbeschränkt hoher Zahl eingespeist werden können und bei den Austrittsstellen keine nachteiligen Nebenwirkungen erzielen. Für die Sporen kommt noch der entscheidende Vorteil der Akkumulationsmöglichkeit in den Planktonnetzen über längere Zeit hinzu.

Grundsätzlich ist die Auffindung einer einzelnen Spore oder eines einzelnen Bakteriums als einwandfreier Nachweis der unterirdischen Verbindung der Wasserwege problematisch. Wenn man jedoch das Ergebnis dieses Versuches im Raum Engen—Welschingen—Ehingen für die Einspeisungen der Triftkörper bei der Hauptversickerungsstelle G betrachtet, kommt man zu einem wesentlich positiveren Bild. Die schöne Sporendurchgangskurve bei der Fassung Nr. 24, das Auftreten von einzelnen Sporen bei Nr. 25 und Nr. 56 einerseits sowie der Nachweis von *Serratia marcescens* ebenfalls in Nr. 24 und in den benachbarten Austritten Nr. 15, 16, 18 und Nr. 60 andererseits runden das Bild soweit ab, daß am Zusammenhang dieser Wasseraustritte mit der Donauversickerung kein Zweifel mehr besteht. Verständlich wird die hydrologische Verbindung vom Brühl zur Quelle Nr. 24 bei Engen-Altendorf, wenn man das topographische Gefälle betrachtet; es ist mit 17‰ deutlich stärker als das Gefälle zur Aachquelle mit 15,3‰.

Nun ist mit Einzelaustritten von Triftkörpern keine Statistik zu treiben. Diese Funde brauchen auch durchaus nicht mit den Hauptaustrittszeiten zusammenfallen. Ferner ist zu erwarten, daß auf denjenigen Stellen, an denen *Serratia marcescens* wiedergefunden wurde, auch Sporen austraten und umgekehrt. Bezeichnend ist das Auftreten von einem Keim *Serratia marcescens* in der Bleichequelle (Nr. 18) und von einer braungefärbten Spore in der benachbarten Bohrung Nr. 56. Beide Wässer haben nahezu denselben chemischen Bestand.

Es ist anzunehmen, daß der gesamte Raum zwischen Engen-Altendorf und Ehingen seine Grundwassereinspeisung zum Teil auch aus der versickernden Donau erhält.

Bemerkenswert sind ferner die Einzelfunde von Triftkörpern in weiter entfernt liegenden Wasseraustritten. Zunächst ist hier der Fund einer braungefärbten Spore bereits eine Woche nach der Einspeisung in der Wasserfassung Nr. 10 bei Beuren an der Aach zu nennen. Dies ist um so erstaunlicher, wenn man bedenkt, daß die von M. A. GEYH durchgeführte absolute Altersbestimmung ein „Mischalter“ von mehr als 4000 Jahren ergab. Man muß daraus schließen, daß sich in den nach Südosten unter die Überdeckung abtauchenden Jurakalken z. T. bevorzugte Karstwasserbahnen befinden, die eine rasche Zuführung von Donau- und Niederschlagswasser in den versenkten und überdeckten Karst ermöglichen.

Eine besondere Überraschung war das Auftreten eines Keimes von *Serratia marcescens* in der Oberen Kressenlochquelle (Nr. 12). Wenn hier keine Verunreinigung vorliegt, muß dieser Triftkörper die Hauptabzugsbahn von der Fridinger Versickerung gekreuzt haben. Solche sich überquerenden Karstwassergerinne sind zwar möglich, wenn auch schwer vorstellbar.

Die bei Neuhausen o. E. eingesetzten grüengefärbten Sporen (Einspeisestelle I) traten bei keiner anderen Stelle als bei der Aachquelle aus. Damit werden die Ergebnisse des Färbversuches von 1962 im wesentlichen bestätigt. Bemerkenswert sind die wesentlich geringeren Fließgeschwindigkeiten, obwohl die dicht westlich anzunehmende Hauptabzugsbahn von der Fridinger Versickerung her (Einspeisestelle D) wesentlich höhere Geschwindigkeiten erbrachte als bei früheren Versuchen.

Für die Triftkörper ist zusammenfassend festzustellen, daß sie sich für die Untersuchung von unterirdischen Gerinnen im Süddeutschen Karst durchaus bewährten. Zumindest für die Sporen ist die Art ihrer Durchgangskurven zwar für den Anstieg und Kulminationspunkt den echt gelösten Markierungsmitteln durchaus entsprechend; der absteigende Kurventeil ist jedoch durchwegs flacher ausgebildet und mehr in die Länge gezogen.

Auf Grund der Erhaltung der Einzelspore als Festkörper auch bei stärkster Verdünnung der Suspension ist unter günstigen Umständen auch dort ein Nachweis möglich, wo die gelösten Stoffe wegen der Unterscheidung der Nachweisbarkeitsgrenze versagen müssen. Sind die Bakterien als Triftkörper gegenüber den Sporen in Lockersedimenten wegen ihres geringeren Durchmessers überlegen, so stellt die praktische Unzerstörbarkeit der Sporen einen wesentlichen Vorteil dar. Dies wirkt sich auch bei der Untersuchung aus, da das Mikroskopieren der Planktonnetzproben auch nach sehr langer Zeit noch erfolgen kann. Bei starker Wasserführung von Bohrungen in Lockergesteinen werden anscheinend die Feinteile so weit ausgeschwemmt, daß Triftkörper mit geringem Durchmesser passieren können.

Die **Salze** haben sich wiederum gut bewährt. Bei einem Einfluß von

Flußwasser müssen jedoch bereits vor der Einspeisung sowohl im Flußwasser als auch an den Austrittsstellen genügend Blindwerte gemessen werden. Ferner müssen die Proben in verhältnismäßig dichtem Zeitabstand entnommen werden. Andernfalls wäre eine Erhöhung über die Grundlasten nicht genügend zu sichern. Steinsalz besitzt den großen Vorteil, daß sowohl das Natrium als auch das Chlorid getrennt voneinander bestimmt werden können. Bei Kalisalz kommt nur die flammenfotometrische Bestimmung in Frage. Kalisalz unterliegt im Karst offenbar nicht dem Ionenumtausch. Bei der Berechnung der erforderlichen Salz mengen sollte man nicht zu kleinlich verfahren. Das etwas teure Kalisalz ist leichter löslich als das Steinsalz, außerdem benötigt man von ersterem wesentlich geringere Mengen. Das Steinsalz kann allerdings u. U. leichter beschafft werden als das Kalisalz, jedoch bereiten die erforderlichen großen Mengen mitunter nicht geringe Schwierigkeiten bei der Einspeisung. Der Vorteil der zweifachen Bestimmungsmöglichkeit wurde bereits erwähnt. Die Genauigkeit der Erfassung ist wohl beim Steinsalz am größten von allen gängigen Markierungsmitteln. Man erhält bei der Auswertung somit auch die genauesten Unterlagen. Im Fall der Versuche 1969 erhielt man auch vom Steinsalz die schönste aller Durchgangskurven, weil eine genügend große Menge eingesetzt wurde. Ein unmittelbarer Vergleich beider Salze ist für die Versuche 1969 nicht möglich, da Kaliumchlorid an anderer Stelle als Natriumchlorid eingesetzt wurde. Bei vorsichtiger Schätzung hätten bei Immendingen 10 Tonnen statt 1 Tonne Kalisalz eingesetzt werden müssen, um dieselbe Kurve zu erzielen wie beim Natriumchlorid.

Bei starken Niederschlägen beobachtet man bei der Aachquelle eine deutliche Verarmung an Natrium und Chlorid, bei Kalium zunächst wohl durch Auswaschung eine kleine Erhöhung mit anschließendem Absinken. Folgt dann eine Trockenperiode, steigen die Salzgehalte wieder an.

Auch das **radioaktive Isotop Chrom-51** bewährte sich als Markierungsmittel. Adsorption und Ionenumtausch wurden nicht beobachtet. Die Sicherungsmaßnahmen bei der Eingabe zur Einhaltung der Strahlenschutzverordnung sind durchaus tragbar. Die Meßtechnik ist so gut, daß geringste Spuren radioaktiver Substanz noch nachgewiesen werden können. Im vorliegenden Versuch lag die höchste aufgetretene Konzentration im Wasser der Aachquelle rd. 3000fach unter der für Abwassereinleitungen zulässigen Konzentration. Radioaktive Isotope sind also durchaus Markierungsmittel, die in der Praxis dort verwendet werden können, wo andere Stoffe nicht in Frage kommen oder wo ein zusätzlicher Tracer benötigt wird.

Nach den Versuchsergebnissen können **Detergentien** durchaus als gute Markierungsmittel angesprochen werden. Allerdings wird man sie nur dort einsetzen, wo andere Stoffe allein nicht ausreichen würden.

Von den beiden angewandten Untersuchungsmethoden ist die kolorimetrische vorzuziehen, wenngleich diese aufwendiger ist als die Methode der Schaumhöhenbestimmung. Bemerkenswert ist, daß beide Methoden verschiedene Ergebnisse brachten. Lediglich der Hauptdurchgang der Detergentien in der Aachquelle wurde von beiden Methoden gleichermaßen erfaßt. Im Gegensatz zur Schaumhöhenbestimmung zeigte die Kolorimetrie in der Aachquelle vor dem Eintreffen der Detergentienwelle praktisch keine Grundlast. Daher erfaßte letztere Untersuchungsmethode den Detergentiendurchgang wesentlich besser.

Die recht beachtliche Grundlast in der Donau, die durch die Kolorimetrie nicht bestätigt wurde, läßt die Vermutung zu, daß durch die Schüttelmethode Schaumstoffe zur Geltung kommen, die auf die Methylenblaufärbung nicht ansprechen. Die Kolorimetrie wäre also spezifischer als die Schaumhöhenbestimmung und dadurch bei Markierungsversuchen geeigneter. Auch läßt sie bessere quantitative Aussagen zu.

Die Schaumstoffe, die in den drei Quellen Nr. 11, 12 und 13 im Krebsbachtal bei Eigeltingen beobachtet wurden, sind durch die Kolorimetrie nicht bestätigt worden. Es muß offenbleiben, ob vielleicht durch die wolkenbruchartigen Niederschläge vom 26. auf 27. August Stoffe in den Untergrund eingespült wurden, die zwar Schaumhöhen erzeugen, jedoch auf die Methylenblaureaktion nicht ansprechen. Der gegenseitige Zusammenhang der Eigeltinger Quellen ist ja durch den Färbversuch bei Worndorf 1963 bewiesen worden. Damals sprachen diese erst lange nach der Aachquelle an. In diesem Fall wäre es umgekehrt.

Beim Einsatz über größere Strecken ist zu beachten, daß weiche Detergentien abgebaut werden. Dies gilt namentlich für Fluß- und Abwassermarkierungen. Sollen dort heute Detergentien verwendet werden, bedarf es auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland einer Ausnahmegenehmigung von dem am 1. Oktober 1964 in Kraft getretenen Detergentiengesetz.

Duftstoffe können lediglich zur Ergänzung anderer Markierungsmittel dienen, es sei denn, man legt nur auf qualitative Ergebnisse Wert. Es ist wünschenswert, daß für diese Stoffe die Polarographie, Kolorimetrie oder die Gaschromatographie Nachweismethoden entwickelt, die rasch und einfach nicht nur quantitative Ergebnisse liefern, sondern auch die Duftstoffe getrennt erfassen.

An Hand des bei der Einspeisestelle A bei Immendingen nahezu gleichzeitig eingegebenen Kaliumchlorids läßt sich für das Dipenten eine Höchstkonzentration in der Aachquelle von rd. 0,13 mg/l ermitteln. Wird diese noch gut riech- und schmeckbare Konzentration wesentlich überschritten, kann es bei den Hauptaustrittsstellen mit den Fischpächtern und Wassernutzungsberechtigten Ärger geben.

Bei den **Farbstoffen** brachte das Sulforhodamin G extra den Nachweis, daß das Einzugsgebiet der Aachquelle beträchtlich westlich der Verbindungslinie oberste Donauversickerungsstelle—Aachquelle reicht. Das bei der Eingabestelle B eingespeiste Sulforhodamin hat demnach die Nebenabzugsbahnen der Sporen und Keime von der Donauhauptversickerung in den Engen—Ehinger Raum gequert. Diese im Karst zweifellos nicht häufige Erscheinung gibt Anlaß zu Überlegungen, ob im Versuchsgebiet durch undurchlässige Schichten Stockwerksbildungen mit verschiedenen Abflußrichtungen vorliegen.

Das Uranin, das als wirksamstes hydrogeologisches Markierungsmittel gilt, wurde bewußt abseitig am Rand des Einzugsgebietes der Aachquelle ausgesetzt. Die Erklärung, warum dieser Farbstoff nicht kräftiger in Erscheinung trat, ist wohl in zwei Gründen zu suchen:

1. Die Einspeisung erfolgte in nicht wasserführende Klüfte eines aufgelassenen Steinbruchs. Das Uranin mußte allein durch die 150 cbm Spülwasser, unterstützt durch das ausgedehnte Kluftnetz, den etwa 150 m tiefer liegenden Karstwasserkörper erreichen. Sehr wahrscheinlich hinderten die zwischengelagerten Zementmergel einen unmittelbaren Abfluß. Die bedeutenden Niederschläge kurz nach der Einspeisung vermochten offenbar keine massive Einfärbung des Karstwassers zustande zu bringen.

2. Die Einspeisestelle liegt in der Nähe des vermutlichen Scheitelpunktes der Karstwasseroberfläche. In dieser Randlage ist naturgemäß keine starke Bewegung des Karstwasserkörpers zu erwarten. Dies erklärt die lange Laufzeit des Uranins. Möglicherweise strömten andere Farbstoffanteile mit noch geringeren Geschwindigkeiten in andere Richtungen oder in den tiefen Karst. Ein objektiver Nachweis dürfte bei den anzunehmenden großen Verdünnungen nicht mehr möglich sein.

Die Ergebnisse des umfassenden Versuches vom 26. August 1969 im Bereich der Donauversickerung—Aachquelle werden in folgenden Punkten zusammengefaßt:

1. Bei hohem Karstwasserstand werden Fließgeschwindigkeiten erreicht, die die normalen Abflußgeschwindigkeiten um ein Mehrfaches übersteigen.
2. Zur Zeit des Versuches, als hoher Karstwasserstand herrschte und bei der Donau eine hohe Versickerungsquote vorlag, erhielt der Engen—Ehinger Raum Grundwassereinspeisungen aus der Donau.
3. Bei der Verwendung von Salzen (Stein- oder Kalisalz) bei Fluß- oder Abwassermarkierungen müssen bei den Austrittsstellen die Grundlasten sehr sorgfältig ermittelt werden.
4. Mit Triftkörpern können hydrologische Verbindungen nachgewiesen werden, bei denen andere Markierungsmittel versagen.
5. Auf der Karstwasserscheide angesetzte Markierungsmittel benötigen sehr lange Zeit zum Wiederaustritt. Unter Umständen werden sie so

weit verdünnt oder sie sinken in den Tiefen Karst ab, daß sie nicht nachgewiesen werden können.

6. Bei entsprechendem Aufwand können auch Detergentien, aktive und inaktive Isotope gute quantitative Ergebnisse liefern.
7. Für Duftstoffe müssen verbesserte Bestimmungsmethoden ersonnen werden, damit sie bei Markierungsversuchen quantitativ auswertbare Ergebnisse bringen können.

Schlußwort

Die Versuche von 1969 haben manche Fragen geklärt und gleichzeitig weitere Fragen aufgeworfen. Künftigen Untersuchungen wird es vorbehalten bleiben, beispielsweise den Donauwasserabfluß in den Engeren Raum quantitativ bei verschiedenen Karstwasserständen zu erfassen oder die nachgewiesenen Querungen von Karstwasserabflüssen zu verfolgen.

Allen ungenannten Helfern, die beim Versuch mitwirkten, der unserem Wissen nach der größte jemals durchgeführte Markierungsversuch war, sei herzlich Dank gesagt.

Folgende Stellen haben den Versuch aktiv unterstützt, auch ihnen schulden die Verfasser herzlichen Dank:

Die Landesstelle für Gewässerkunde und wasserwirtschaftliche Planung in Karlsruhe durch die Bereitstellung von Geldmitteln für die Versuchsdurchführung und Laboratoriumsarbeiten,

das Bürgermeisteramt der Stadt Aach durch Zurverfügungstellung mehrerer Räume für die Untersuchungen am Ort der Hauptaustrittsstelle,

das Regierungspräsidium Südbaden, Abt. V Wasserwirtschaft, durch Verwaltungsarbeit,

der Herr Oberbürgermeister Balz und das Tiefbauamt der Stadt Tuttlingen durch Befürwortung und Bewältigung der umfangreichen Salzeingabe,

die Gewerkschaft Baden in Buggingen, Landkreis Müllheim, durch Bereitstellung des Kalidüngesalzes,

die Chemischen Werke Hüls AG in Marl, Landkreis Recklinghausen, durch kostenlose Lieferung des harten Detergens,

die EVS-Energieversorgung Schwaben in Tuttlingen durch die Unterstützung bei der Aachquelle,

das Wasserwirtschaftsamt Donaueschingen durch die Vorbereitung und Mithilfe bei den Eingabestellen bei Immendingen (A), bei Möhringen/Brühl (G) und bei Liptingen (E),

das Wasserwirtschaftsamt Rottweil durch den Ausbau der Schluckstelle bei den Fridinger Donauschwinden (Eingabestelle D) sowie

das Geologische Landesamt Baden-Württemberg in Freiburg im Breisgau durch die Zurverfügungstellung seines gesamten Laboratoriumspersonals und die Bereitstellung eines Dienstkraftwagens.

Literatur

- ANDRES, G. & M. A. GEYH: Untersuchungen über den Ursprung und die Bewegungen des gespannten Tiefenwassers im überdeckten Burgsandstein mit Hilfe von ^{14}C - und ^3H -Analysen. Wasserwirtschaft, **60**, 1970 (im Druck).
- BAUER, F.: Erfahrungen beim Uraninnachweis mit Aktivkohle. Steir. Beitr. Hydrogeologie, **18/19**, Graz 1967, S. 169—178.
- BERGEY'S Manual of determinative Bacteriology, 7. Ed., Baltimore 1957.
- BERZ, K. C.: Die Grundwasserverhältnisse im Versickerungsgebiet der oberen Donau; ein Beitrag zum Problem der oberen Donau; ein Beitrag zum Problem der Karsthydrographie. Mitt. geol. Abt. württ. statist. Landesamt, **11**, Stuttgart 1928, 82 S.
- BLANCHARD, R. L., G. W. LEDDICOTTE & D. W. MOELLER: Neutron activation analysis of drinking water. Second United Nations International Conference on the peaceful uses of Atomic Energy, **28**, P/796, 1958, S. 311—516.
- BONDY, C.: Etude sur l'application des traceurs activable. Rapport Euratom, EUR 3128 f., 1966.
- BREUNINGER, F. W.: Fons Danubii primus et naturalis oder die Urquelle des weltberühmten Donaustroms. Tübingen 1719, 388 S.
- CLESS-BERNERT, T. et al.: Flow measurements on the Danube. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970.
- Detergentengesetz: Verordnung über die Abbaubarkeit von Detergentien in Wasch- und Reinigungsmitteln. Bundesgesetzblatt der Bundesrepublik Deutschland, I, S. 698—706, 1. Dezember 1962.
- Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. 3. Auflage (Ringordner), Weinheim 1960—1968.
- Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Sonderheft Land Baden-Württemberg, Abflußjahr 1966, Stuttgart 1969.
- ERB, L.: Über den Mechanismus der Donauversickerung und der Aachquelle. Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz, N. F. 5, Freiburg i. Br. 1952, S. 267—280. Autorenreferat in: Das Gas- u. Wasserfach, **94**, München 1953, S. 422—423.
- ERB, L.: Geologische Ergebnisse von drei Bohrungen auf Eisenerz im Hegau. Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz, N. F. 7, Freiburg i. Br. 1958, S. 105—111.
- ERIKSON, E.: Radioactivity in Hydrology. Nuclear Radiation in Geophysics, ed. by H. Israel and A. Krebs, Springer 1962, No 42.
- FEIGL, F.: Tüpfelanalyse. 4. Aufl. Bd. II: Organ. Teil. Frankfurt a. M. 1960, S. 68.
- FISCHER, W. K.: Nachweismethoden für Detergentien. Münchener Beitr. z. Abwasser-, Fischerei- u. Flußbiologie, **9**, München 1962, S. 163—183.
- GAT, J. R.: The determination of characteristics of water bodies with the aid of bomb produced tritium pulses. ^{14}C and Tritium Dating, Washington 1965, S. 630—642.
- GEYER, O. F. & M. P. GWINNER: Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg. 2. Aufl., Stuttgart 1968, 228 S.
- GEYH, M. A.: Hannover Radiocarbon Measurements IV. Radiocarbon, **9**, 1967, S. 198—217.
- GEYH, M. A.: Messung der Tritium-Konzentration in Salzlaugen. Kali und Steinsalz, **5**, 1969, S. 208.
- GEYH, M. A.: ^{14}C -concentration of soil lime and aspects of the ^{14}C dating of groundwater. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970, SM-129/14 (1970 a).
- GEYH, M. A.: Zeitliche Abgrenzung von Klimaänderungen mit ^{14}C -Daten von Kalksinter und organischen Substanzen. Beih. Geol. Jb. (1970 b, im Druck).

- GEYH, M. A. & G. SIEBERT: Die Hydrogeologie der tieferen Grundwasserstockwerke im Raume Dämmerwald unter Berücksichtigung chemischer und isotopenphysikalischer Untersuchungen. *bbr*, **21**, 1970, S. 81—87.
- GEYH, M. A. & K. F. KUCKELKORN: Zur Gliederung eines Grundwasserkörpers mit Hilfe von ^{14}C - und ^3H -Konzentrations-Bestimmungen an Wasserproben. *Das Gas- und Wasserfach*, **110**, 1969, S. 1394—1397.
- GEYH, M. A. & I. WENDT: Results of water sample dating by means of the model by MÜNNICH and VOGEL. ^{14}C and Tritium Dating, Washington 1965, S. 597—603.
- GUIZERIX, J. et al.: The measurement of variable flow patterns, Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970.
- HAFNER, G.: Die Geologie des Blattes Nendingen (Nr. 7919) 1 : 25 000. Arb. geol.-Paläont. Inst. Univ. Stuttgart (TH), N. F. **58**, Stuttgart 1969, 246 S.
- HAHN, W.: Erläuterungen zu Blatt 7920 Leibertingen. Geol. Karte Baden-Würt. 1 : 25 000, Stuttgart 1968, 106 S.
- HANSHAW, B. B., W. BACK & M. RUBIN: Radiocarbon determination for estimating groundwater flow velocities in Central Florida. *Science*, **148**, 1965, S. 494.
- HASENMAYER, J.: Aachtopfquellhöhle entdeckt. *Die Natur*, **71**, Schmiden bei Stuttgart 1963, S. 6.
- HASENMAYER, J.: Tauchvorstoß von 300 m in die „unterirdische Donau“. *Mitt. Verb. deutscher Höhlen- u. Karstforscher*, München 1968, S. 26—30.
- HOETERMANS, J. C., H. E. SUESS & H. W. MUNCK: The effect of industrial fuel combustion on the ^{14}C -level of atmospheric CO_2 . *Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting*, IAEA, Wien 1967, S. 57.
- Hydrogeologische Karte 1 : 500 000 (Blatt Augsburg) mit Erläuterungen.
- KÄSS, W.: Erfahrungen bei Färbversuchen mit Uranin. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, **17**, Graz 1965, S. 21—65.
- KÄSS, W.: Schrifttum zur Versickerung der oberen Donau zwischen Immenzingen und Fridingen (Südwestdeutschland). *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, **21**, Graz 1969, S. 215—246.
- KÄSS, W.: Der Salzungsversuch 1969 im Stadtgebiet Tuttlingen und sein Ergebnis. *Tuttlinger Heimatblätter* 1970 (im Druck).
- KLOTTER, H. E.: Über die durch Detergentien verursachte Schaumbildung in einem kanalisiertem Fluß, ihre Entstehung und Bedeutung. *Vom Wasser*, **XXIV**, Weinheim 1957, S. 171—202.
- KNOP, A.: Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im badischen Oberlande. *N. Jb. Min., Geologie und Paläontologie*, 1878, S. 350—363.
- KNUTSON, G.: Tracing Ground-water Flow in Sand and Gravel Using Radioactive Isotopes. *Steir. Beitr. Hydrogeologie*, **18/19**, Graz 1966/67, S. 13—31.
- KRUGER, P. & J. K. CHANELL: The use of rare-earth elements as tracers in estuaries. *Use of Isotopes in Hydrology*, IAEA, Wien 1970.
- LALLEMAND, A.: Contribution a la sélection des traceurs radioactifs pour l'hydrologie. *Rapport Euratom*, EUR 4222 f., 1969.
- LONGWELL, J. & W. D. MANIACE: Determination of anionic detergents in sewage effluents and river waters. *Analyst*, **80** (1955), S. 167.
- MANZ, O.: Die Ur-Aare als Oberlauf und Gestalterin der pliozänen Oberen Donau. *Hohenzoll. Jh.* **1** und **2**, Hechingen 1934 und 1935, S. 113—160 und 187—227.
- MÜNNICH, K. O.: Messung des ^{14}C -Gehaltes von hartem Grundwasser. *Naturwissenschaften*, **44**, 1957, S. 32—33.
- MÜNNICH, K. O.: Isotopen-Datierung von Grundwasser. *Naturwissenschaften*, **55**, 1968, S. 158—163.
- MÜNNICH, K. O., W. ROETHER & L. THILO: Dating of groundwater with tritium and ^{14}C -Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1967, S. 305.

- MÜNNICH, K. O. & J. G. VOGEL: ^{14}C -Altersbestimmung von Grundwasser. Naturwissenschaften, **46**, 1959, S. 10—12.
- NYDAL, R.: Further investigation on the transfer of radiocarbon in nature. J. Geophys. Res. **73**, 1968, S. 3617.
- PANTLE, R.: Unveröffentlichtes Manuskript v. 7. Juli 1955.
- PEARSON, Jr., F. J.: Use of C-13/C-12 ratios to correct radiocarbon ages of material initially diluted by limestone. ^{14}C and Tritium Dating, Washington 1965, S. 357—366.
- PEARSON, Jr., F. J. & B. B. HANSHAW: Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon 14 dating. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970, SM-129/18.
- PEARSON, Jr., F. J. & D. E. WHITE: Carbon 14 ages and flow rates of water in Carrizo Sand, Atascosa County, Texas. Water Res. **3**, 1967, S. 251—261.
- SCHAUFELBERGER, P.: Geologische und hydrologische Verhältnisse zwischen der Donauversickerung und der Aachquelle. Mitt. bad. geol. Landesanstalt, **10**, 1929, S. 561—638.
- SCHIEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart 1966, 460 S.
- SCHMIDT, G.: Bestimmung einiger Spurenelemente im Rheinwasser. Dissertation, TH Karlsruhe, 1968.
- SCHMIDT, K.: Hydrologisches Problem und wasserwirtschaftliche Aufgabe Donauversickerung. Die Wasserwirtschaft, **51**, 1961, S. 268—272.
- SCHNITZER, W. A.: Die Markierung unterirdischer Wasserwege mit Hilfe von Alkylbenzolsulfonaten (Detergentien). Geol. Bl. NO-Bayern, **15**, Erlangen 1965, S. 50—56 (1965 a).
- SCHNITZER, W. A.: Eine neue Methode zur Markierung von Karstwasserwegen. Die Höhle, H. 3, Wien 1965 (1965 b).
- SCHNITZER, W. A.: Die Anwendung von Detergentien und verwandten Stoffen in der Hydrogeologie, verbunden mit einem Versuch im Buchkogelgebiet bei Graz. Steir. Hydrogeologie, Graz 1967, S. 231—234 (1967 a).
- SCHNITZER, W. A.: Ergebnisse und Erfahrungen bei Markierungsversuchen im Karst der nördlichen Frankenalb. Jh. Karst- u. Höhlenkunde, H. 7, München 1967 (1967 b).
- SCHNITZER, W. A.: Die Anwendung von Alkylbenzolsulfonaten zur Markierung unterirdischer Wasserwege. Mémoires I. A. H.-Kongress 1965, **VII**, Hannover 1967, S. 217—219 (1967 c).
- SCHNITZER, W. A.: Geologischer Aufbau und Karsterscheinungen der Altmühl- alb östlich Eichstätt (verbunden mit einer Karstwassermarkierung). Geol. Bl. NO-Bayern, **18**, H. 2, Erlangen 1968, S. 112—120.
- SCHNITZER, W. A. & W. WAGNER: Markierungsversuche mit Geruchsstoffen in der Karsthydrologie. Geol. Bl. NO-Bayern, **17**, Erlangen 1967, S. 179—194.
- SCHNITZER, W. A. & W. WAGNER: Welche Anforderungen müssen Geruchsstoffe für Karstwassermarkierungen erfüllen? Vom Wasser, **35**, Verlag Chemie Weinheim/Bergstr. 1969, S. 227—236.
- SCHREINER, A.: Basaltgänge im verkarsteten Oberen Weißen Jura bei Immen- dingen/Donau. Mitt. bad. Landesver. Naturkunde u. Naturschutz, N. F. **7**, Freiburg i. Br. 1959, S. 305—312.
- SCHREINER, A.: Über den Weißen Jura im Hegau. Jh. geol. Landesamt Baden- Württemberg, **5**, Freiburg i. Br. 1961, S. 243—277.
- SCHREINER, A.: Erläuterungen zu Blatt 8118 Engen. Geol. Karte Baden-Würt- temberg 1 : 25 000, Stuttgart 1966, 190 S.
- SCHREINER, A.: Geologische Ergebnisse der Thermalwasserbohrung Singen 1966. Z. Hegau, Singen 1967, S. 195—204.

- SCHREINER, A.: Eiszeitliche Rinnen und Becken und deren Füllung im Hegau und westlichen Bodenseegebiet. Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **10**, Freiburg i. B. 1968, S. 79—104.
- SCHREINER, A.: Erläuterungen zur geologischen Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung. Geol. Landesamt Baden-Württ., Freiburg 1970.
- SCHULZ, G., K. EISSELE, W. KÄSS, W. KNAPP & H. LOMMEL: Erprobung verschiedener Markierungsstoffe für unterirdische Wässer bei Oberndorf a. N. Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **5**, Freiburg 1961, S. 323—341.
- SIEGENTHALER, U., H. OESCHGER & E. TONGIORGI: Tritium and ^{18}O in natural water samples from Switzerland. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970, SM-129/22.
- SMITH, D. B., P. L. WEARN, H. J. RICHARDS & P. L. ROWE: Water movement in the unsaturated zone of high and low permeability strata using natural tritium. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970, SM-129/6.
- SPITZ, W.: Erläuterungen zu Blatt Möhringen. Geol. Spezialkarte Baden, Freiburg i. Br. 1930, 107 S.
- STRÄSSER, M.: Studien zum Grundwassermechanismus des nordwestlichen Bodenseeraumes. Freiburger Geogr. Hefte, H. 2, Freiburg 1966, 82 S.
- TAMERS, M. A., K. D. BALKE & H. W. SCHARPENSEEL: Untersuchungen zur Fließgeschwindigkeit des Grundwassers durch Bestimmung der Radiokohlenstoff- und Tritiumaktivität. Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung, **6**, 1968, S. 364—380.
- TÜRK, W.: Wesen und Wirken der Donauversinkung. (Als Manuskript gedruckt.) Karlsruhe 1932, 64 S.
- VOGEL, J. C.: ^{14}C dating of groundwater. Use of Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1970, SM-129/15.
- WAGNER, Gerold: Über Klüfte und Horizontalstyliolithen in Süddeutschland. Z. deutsch geol. Ges., **109**, Hannover 1958, S. 276—277.
- WENDT, I., W. STAHL, M. GEYH & H. FAUTH: Model experiments for ^{14}C water age determinations. Isotopes in Hydrology, IAEA, Wien 1967, S. 321—328.
- WERNER, J.: Ergebnisse der Auswertung von Flachbohrungen im Bereich des Grobsandzuges der Oberen Meeresmolasse (Gebiet Stockach-Pfullendorf). Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F. **48**, Stuttgart 1966, S. 105—120.

Geologische Karten:

- ERB, L.: Bl. Hilzingen (heute Gottmadingen 8218). Geol. Spezialkarte von Baden 1 : 25 000, Bad. geol. Landesamt, Freiburg i. Br. 1931.
- ERB, L., H. A. HAUS & E. RUTTE: Bl. Stockach 8120. Geol. Karte von Baden-Württemberg 1 : 25 000, Geol. Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br. 1962.
- ERB, L.: Geologische Karte des Landkreises Konstanz mit Umgebung 1 : 50 000. Geol. Landesamt Bad.-Württ., Freiburg i. Br. 1967.
- HAHN, W.: Bl. Leibertingen 7920. Geol. Karte von Baden-Württemberg 1 : 25 000, Geol. Landesamt Bad.-Württ., Freiburg i. Br. 1969.
- SCHREINER, A.: Bl. Engen 8118. Geol. Karte von Baden-Württemberg 1 : 25 000, Geol. Landesamt Bad.-Württ., Freiburg i. Br. 1966.
- SPITZ, W.: Bl. Möhringen (heute Tuttlingen 8018). Geol. Spezialkarte von Baden 1 : 25 000, Bad. geol. Landesamt., Freiburg i. B. 1930.

Summary

After two years of preparatory work (hydrogeological detailed mapping and investigation of the contents of environmental isotopes of the waters) a large-scale combined tracing experiment was carried out in the area of the upper Danube (Baden-Württemberg, Southwestern Germany) in autumn 1969.

In this area the Danube crosses the jurassic limestone of the Schwäbische Alb which implies considerable water losses of the river into the karstic carbonate rocks. This leakage, particularly appearing near the cities of Immendingen, Möhringen, Tuttlingen and Fridingen, causes every year in dry seasons an entire drainage of the Danube bed for several months, which leads to difficulties in the waste water disposal.

The Danube water oozing away reappears again in the Aach spring. The Aach-spring, with an average yield of 8,8 cbm/s one of the largest springs in Germany, is a tributary to the Rhine. Since the water of the Aach is used by industries, too, the experiments to close the ponors and open joints in the Danube bed, lead to violent judicial arguments.

The tracing experiment carried out in 1969 aimed at covering the connection already known between Danube and Aach and further to the underground water regime of this area entirely, besides trying out new labelling materials. The labelling materials injected on August 26, 1969, in various ponors and sinkholes were: 1000 kg KCl, 105 l Dipenten, 8 kg Sulphorhodamine G extra, 250 kg Ammonbromide, 4 l Chrome-51, 20 kg Lanthaninstrate, 400 kg detergents, 75 kg Isobornylacetate, 50 kg sodium-fluorescine, the germ *serratia marcensens*, 50 t sodium chloride, 45 kg respect. 28 kg brown and green dyed lycopodium spores.

The cooperative experiment of institutions of Austria, Germany and Yugoslavia showed besides the successful trying out of new labelling materials resp. methods, that the Danube waters — as is already known — does reappear with the main quantity in the Aach waters, but besides takes an influence on the ground water conditions in the entire area between Engen, Beuren and Eigeltingen, even in places where the jurassic limestones dip below the tertiary sediments (marl and sandstone) towards the South.

Anschriften der Verfasser:

Diplomgeologe Dr. H. BARSCHÉ, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, D-8 München 2, Luisenstraße 37

Direktor Dr. F. BAUER, Speläologisches Institut beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, A-1010 Wien I, Hofburg, Bettlerstiege

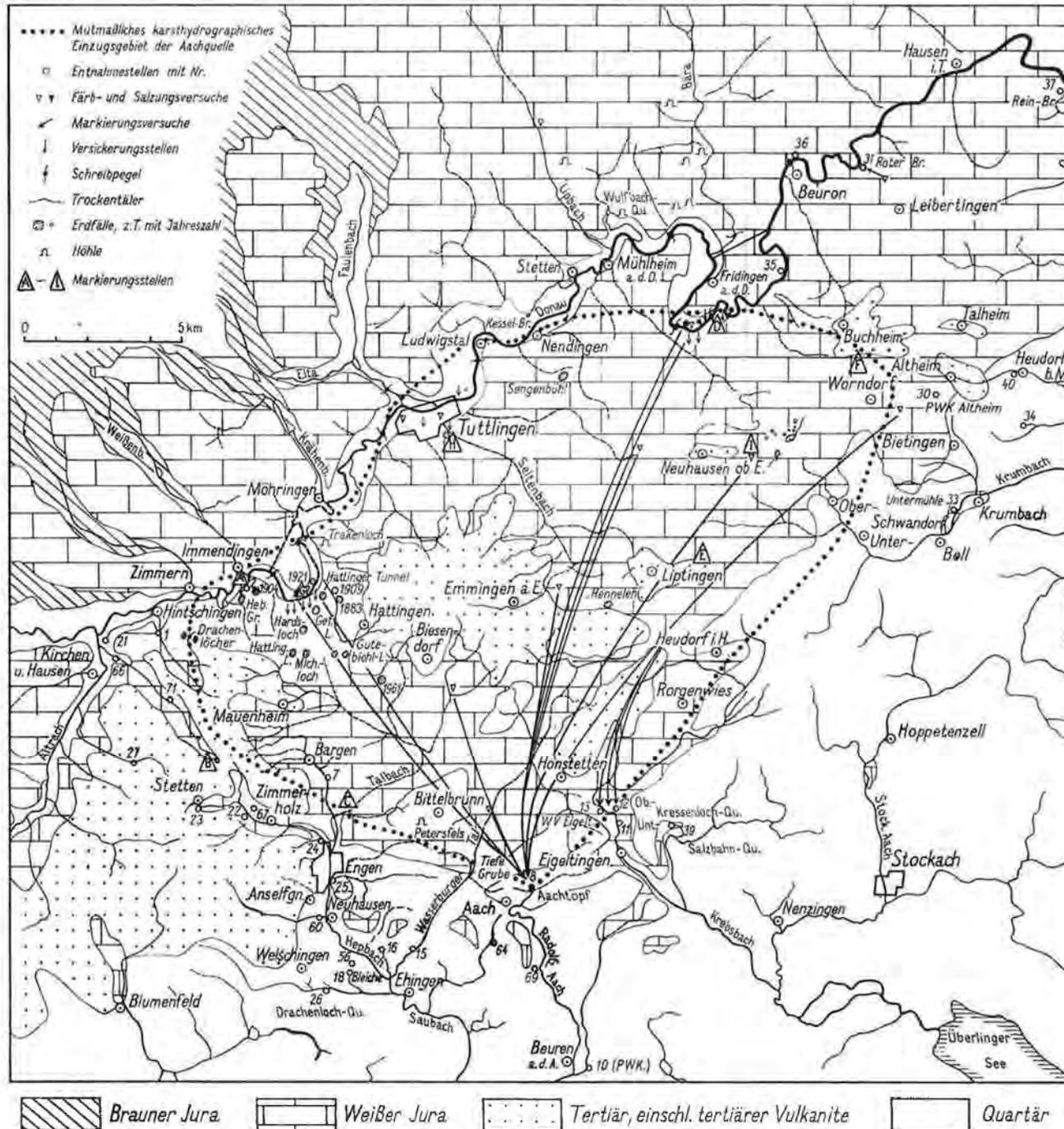
Diplomphysiker H. BEHRENS, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, D-8 München 2, Luisenstraße 37

Diplomphysiker Dr. K. BUCHTELA, Atominstitut der Österreichischen Hochschulen, A-1020 Wien, Schüttelstraße 115

- Dr. med. Dr. phil. H. DOMBROWSKI, Institut für Balneologie und Klimaphysiologie an der Universität Freiburg, D-78 Freiburg im Breisgau, Hermann-Herder-Straße 7
- Oberregierungsbiologe Dr. R. GEISLER, Landesstelle für Gewässerkunde, D-78 Freiburg im Breisgau, Sautierstraße 20
- Diplomphysiker Dr. M. A. GEYH, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, D-3 Hannover, Alfred-Bentz-Haus, Postfach 54
- Dr. H. HÖTZL, 2. Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH), D-75 Karlsruhe, Kaiserstraße 12
- Prof. Dr. F. HRIBAR, Hidrometeoroloski Zavod SRS, Ljubljana, Resljeva 18, Jugoslavia
- Oberlandesgeologe Dr. W. KÄSS, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, D-78 Freiburg im Breisgau, Albertstraße 5
- Dr. J. MAIRHOPER, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, A-1030 Wien III, Objekt 210
- Prof. Dr. V. MAURIN, 2. Lehrstuhl für Geologie und Abteilung für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH), D-75 Karlsruhe, Kaiserstraße 12
- Prof. Dr. H. MOSER, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, D-8 München 2, Luisenstraße 37
- Prof. Dr. F. NEUMAIER, Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlenforschung, D-8 München 2, Luisenstraße 37
- Diplomphysiker J. SCHMITZ, Laboratorium für Isotopentechnik der Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., D-75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Prof. Dr. W. A. SCHNITZER, Geologisches Institut der Universität Erlangen, D-852 Erlangen, Schloßgarten 5
- Oberlandesgeologe Dr. A. SCHREINER, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, D-78 Freiburg im Breisgau, Albertstraße 5
- Diplomphysiker Dr. H. VOGG, Laboratorium für Isotopentechnik der Gesellschaft für Kernforschung m. b. H., D-75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Prof. Dr. J. ZÖTL, Vereinigung für Hydrogeologische Forschungen in Graz, A-8010 Graz/Steiermark, Rechbauerstraße 12

Tafel I

Übersichtskarte des Versuchsgebietes. Abflußrichtungen bei früheren Markierungsversuchen sind durch die langen Pfeile dargestellt. Die ausgewählten Eingabestellen für den Versuch 1969 tragen in den Dreiecken die Bezeichnungen A — I.



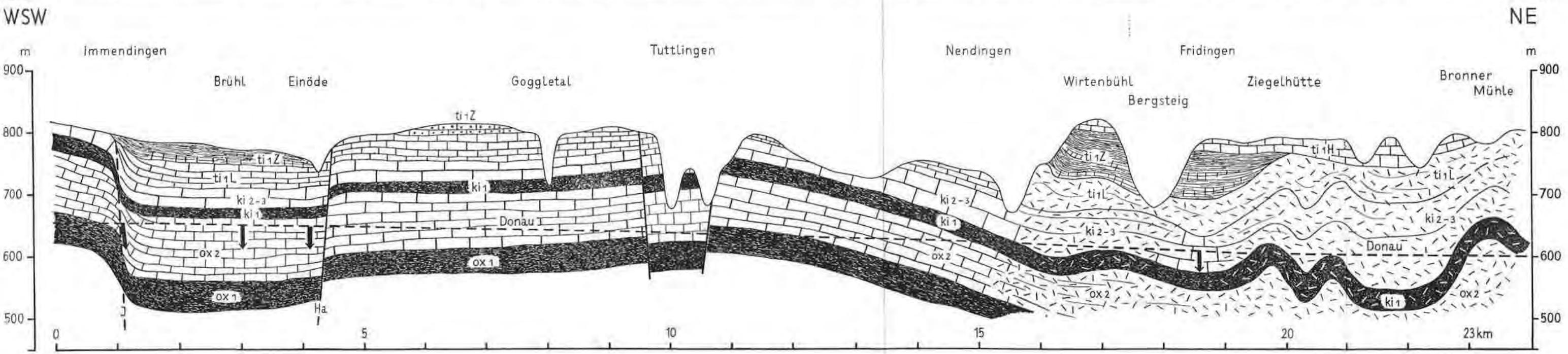
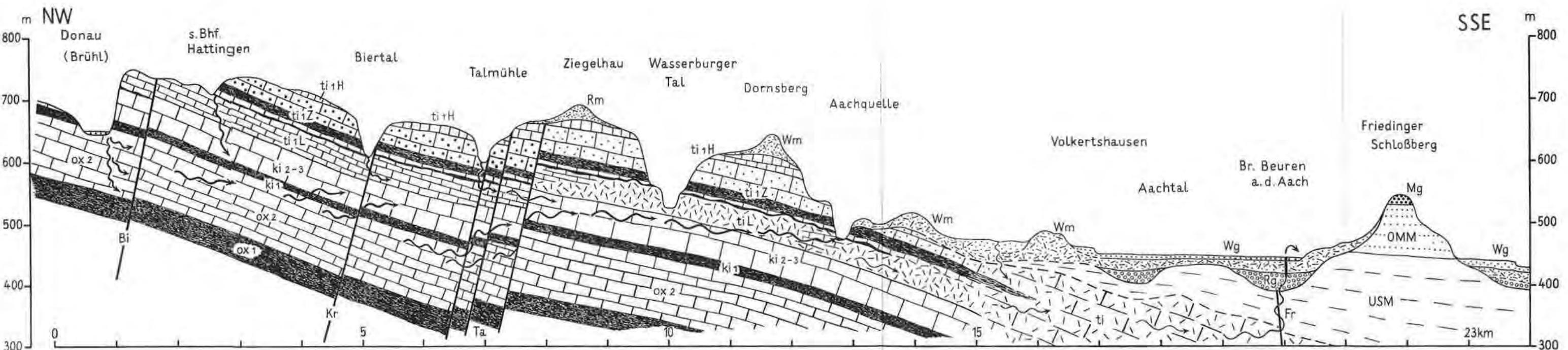
Tafel II

Geologische Schnitte, 10fach überhöht, vereinfachte Darstellung.

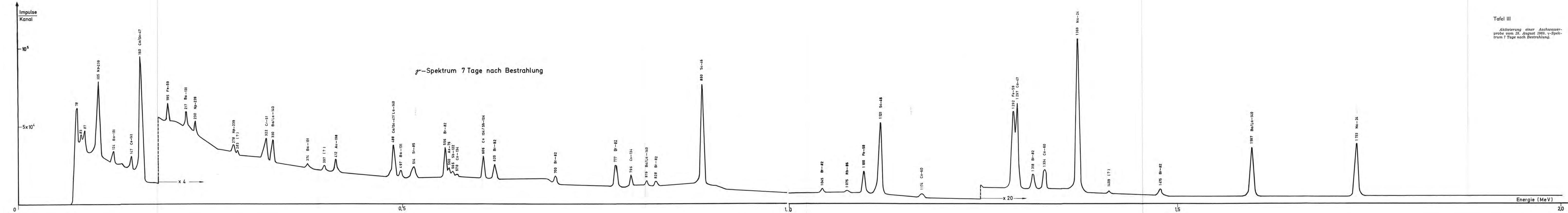
Oben: Schnitt Donauversenkung (Brühl) — Aachquelle — Beuren a. d. Aach. Vermutlicher Weg des aus der Donau und dem Zwischengebiet versinkenden Wassers zur Aach und nach Beuren (Wellen mit Pfeil).

Unten: Schnitt südlich der Donau. Von Nendingen nach NE (nach G. HAFNER, 1969). Dicke Pfeile = Versinkungsstellen Donau.

- Wg Würm, Kies — Sand
- Wm Würm, Moräne
- Rg Rinnenschotter
- Mg Mindelschotter
- OMM Obere Meeresmolasse
- USM Untere Süßwassermolasse
- ti 1 H Hangende Bankkalke (W₃)
- ti 1 Z Zementmergel (W₂)
- gegliedert in Rauhe Kalke (punktiert), Mergel und Mergelkalke (gestrichelt)
- ti 1 L Liegende Bankkalke (W₁)
- ti Tithon, ungegliedert (W₀)
- ki 2-3 Kimmeridge-Kalke (W_{8, 9})
- ki 1 Kimmeridge-Mergel (W₇)
- ox 2 Oxford-Kalk (W₆)
- ox 1 Oxford-Mergel (W₅)
- Bi Biesendorfer-Verwerfung
- Kr Kriegertal-Verwerfung
- Ta Talmühle-Verwerfungen
- Fr Friedinger-Verwerfung
- J Immendinger Flexur
- Ha Hattinger-Verwerfung

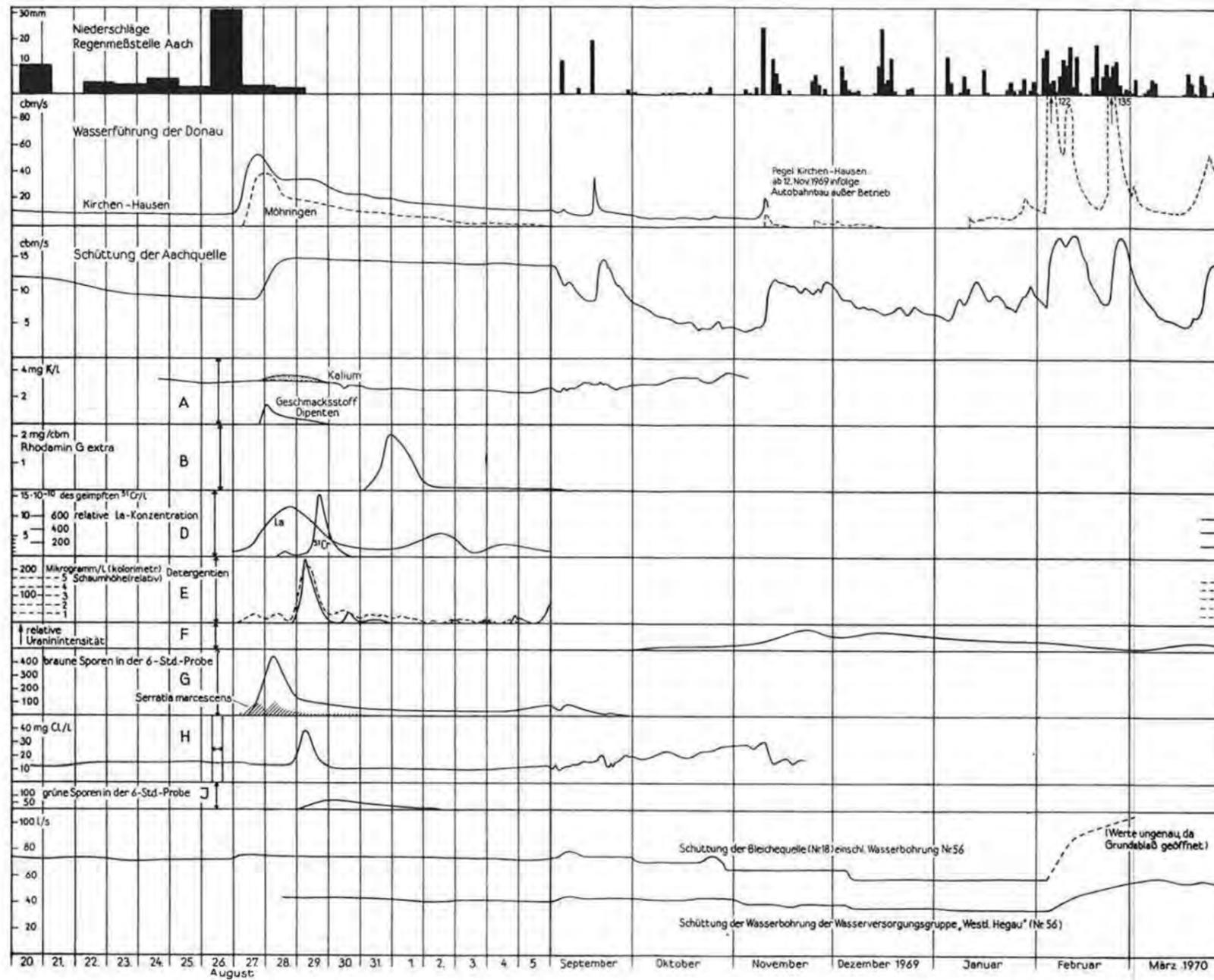


Aktivierung einer Anionwasserprobe vom 28. August 1969. γ -Spektrum 7 Tage nach Bestrahlung.



Übersicht über die Markierungsmittel-Eingaben am 26. August 1969 im Bereich der Donauversickerung - Achquelle und deren Austritte

Eingabestelle Federführender	Lage Rechts- u. Hochwert	Meereshöhe Entferng. z. Achqu.	Höhenunterschied Gefälle z. Achqu.	Markierungsmittel	Vorspülung	Einspeisung	Nachspülung	1. Auftreten in der Achquelle lineare Fließgeschwindigkeit	Hauptaustritt in der Achquelle	Höchste Konzentration	Halbwerts- breite	Schwer- punkt	Wiederausgetre- tener Markier- ungsmittelanteil	Bemerkungen
A STRAYLE	Donauschwinden südl. Immendingen 80 460 / 10 860	655,3 m 13,3 km	179,9 m 13,5 ‰	1000 kg KCl (60% K ₂ O)	laufend 100 - 150 L/s Donauwasser	12 35 - 13 00	laufend 100 - 150 L/s Donauwasser	27.8., 23 ⁰⁰ 364 m / Std.	28.8., 19 ⁰⁰ 208 m / Std.	0,44 mg / l	—	—	rd. 100 %	Störung durch Einspeisung bei H
				150 l Dipenten	13 15 - 13 55	27.8., 21 ⁰⁰ 422 m / Std.	29.8., 2 ⁰⁰ 360 m / Std.	rd. 0,13 mg / l	—	—	?	—		
B BATSCHÉ	Doline 800 m nordwestl. Hegeublick 78 900 / 06 500	765 m 11,4 km	290 m 25,4 ‰	8 kg Sulförhodamin G extra	ab 24.8. 14 ⁰⁰ laufend 0,5 L/s	13 55 - 14 00	bis 2.9. laufend 0,5 L/s	31.8., 5 ⁰⁰ 103 m / Std.	31.8., 23 ⁰⁰ 88 m / Std.	2,1 · 10 ⁻⁹ g/ml = 2,1 mg / cbm	25 Std.	1.9., 12 ⁰⁰	39,8 % (bis 10.9., 12 ⁰⁰)	—
C HÖTZL	Untersuchungsbohrung Autobahnbrücke nordl. Engen 83 510 / 03 590	538 m 6,45 km	63 m 9,7 ‰	250 kg Ämonbromid tech., in 1000 l Wasser	13 ⁰⁰ - 14 ⁰⁵ mit 5 l/s = 7200 l	14 05 - 14 30	14 30 - 15 00 mit 5 l/s = 8000 l	—	—	—	—	—	—	Kein Austritt feststellbar!
D BEHRENS	Ausgebaute Donau- schwinden in der Fridinger Schleife 94 550 / 18 800	617,9 m 18,3 km	142,5 m 7,8 ‰	4 Curie ⁵¹ Cr, komplexgebunden	laufend mind. 80 L/s Donauwasser	9 13 - 9 17	laufend mind. 80 L/s Donauwasser	28.8., 16 ⁰⁰ 332 m / Std.	29.8., 16 ⁰⁰ 232 m / Std.	6 · 10 ⁻⁹ Ci/l	10 Std.	29.8., 19 ⁰⁰	über 93 %	Beginn des Hauptaustritts: 29.8., 12 ⁰⁰
				20 kg Lanthannitrat + 62 kg La, komplexgeb.	9 50 - 11 45	28.8., 4 ⁰⁰ 968 (?) m / Std.	28.8., 16 ⁰⁰ 332 m / Std.	2,4 mg La / cbm	—	—	rd. 74 %	Austrittskurve mit ⁵¹ Cr nicht korrelierbar. Nebenaustritt in Nr. 12		
E GEISLER	Sickerschacht in Lehingrube 2 km östl. Liptingen 95 150 / 11 430	720 m 11,8 km	245 m 20,5 ‰	200 kg harte Deter- gentien (Marlon 384)	laufend rd. 0,5 L/s	9 25 - 9 55 (in 1700 l gelöst)	10 ⁰⁰ - 11 40 17,7 cbm	29.8., 0 ⁰⁰ 190 m / Std.	29.8., 7 ⁰⁰ 170 m / Std.	235 mg / cbm	rd. 8 Std.	29.8., 12 ⁰⁰	rd. 80 %	Weitere Schaumstoffaus- tritte in Nr. 11, 12 und 13 durch Schüttelmethode erfaßt.
				200 kg weiche Deter- gentien (Marlon AFR)		10 ¹⁰ - 10 25		30.8.	31.8.	—	—	?	nicht eindeutig faßbar.	
				75 kg Isobor- nylazetat		10 - 10 30		—	—	—	—	—	—	—
F VILLINGER	Stbr. 800 m südl. Buchheim 99 240 / 18 280	785 m 19,8 km	310 m 15,6 ‰	50 kg Uranin	9 45 - 11 00 mit 10 l/s = 45 cbm	11 00 - 11 05 (in 200 l gelöst)	11 05 - 14 30 mit 10 l/s = 125 cbm	Anfang Okt. rd. 24 m / Std.	Ende Nov. rd. 8 m / Std.	rd. 0,005 mg / cbm	—	—	rd. 0,1 %	Wird über die Berichts- zeit hinaus beobachtet.
G ZÖTL	Hauptversickerung der Donau am „Brühl“ 82 400 / 10 350	654 m 11,7 km	178,6 m 15,6 ‰	Serratia marcescens, 30 · 10 ¹⁸ Keime	laufend mind. 100 L/s Donauwasser	9 35	laufend mind. 100 L/s Donauwasser	(27.8., 2 ⁰⁰) 28.8., 0 ⁰⁰ 304 m / Std.	28.8., 8 ⁰⁰ 252 m / Std.	4 Keime je 0,5 ml	—	—	rd. 0,0001 % = 10 ⁻⁶	Nebenaustritte in Nr. 12, 15, 16, 18, 24, 60.
				45 kg braungefärbte Lycopodiumsporen	12 10 - 12 25 (+ 160 l Wasser)	27.8., 15 ⁰⁰ 450 m / Std.	28.8., 10 ⁰⁰ 255 m / Std.	425 Sporen je 6 Std.-Probe	—	—	—	Nebenaustritte in Nr. 10, 24, 25, 56		
H KÄSS	Doline v. 1711 Tuttlingen 86 820 / 15 420	665 m 14,2 km	190 m 13,4 ‰	50 t Streusalz	—	8 00 - 16 00 (mit 8,7 l/s = 250 cbm)	16 00 - 17 00 mit 28 l/s = 100 cbm	29.8., 0 ⁰⁰ 222 m / Std.	29.8., 7 ⁰⁰ 212 m / Std.	0,70 Milligramm- äquivalente / l	12,5 Std.	29.8., 8 ⁰⁰	66,2 %	—
I MAURIN	Ausgebaute Doline Abwasserversorg. östlich Neuhausen 95 920 / 14 820	735 m 15,4 km	260 m 16,9 ‰	28 kg grüngefärbte Lycopodiumsporen	ständige Versickr. von 5 l/s gekl. Abwasser	12 10 - 12 15 (+ 400 l Wasser)	wie Vorspülung + 700 l Wasser	29.8., 9 30 226 m / Std.	30.8., 0 ⁰⁰ 184 m / Std.	63 Sporen je 6 Std. Probe	—	—	—	—



Tafel V

Übersicht über die Durchgangskurven der Markierungsmittel in der Aachquelle vom Markierungsversuch am 26. August 1969.

Von oben nach unten:
 Niederschläge der Regenmeßstelle Aach, Wasserführung der Donau bei den Pegeln Kirchen-Hausen und Möhringen (der Unterschied beider Schreibpegel zuzüglich 4‰ der Wasserführung bei Kirchen-Hausen entspricht den Versickerungsmengen bei Immendingen und am Brühl; bei Wasserführung 0 am Pegel Möhringen herrscht Vollversickerung), Wasserführung der Aachquelle, Schematische Durchgangskurven der Markierungsmittel der Eingabestellen A, B, D, E, F, G, H und I in der Aachquelle, Schüttungen der Beobachtungsstellen 56 und 18.

Man beachte die verschiedenen Zeitmaßstäbe vom 20. August bis 5. September und vom 6. September 1969 bis 31. März 1970.